

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE

PAR
MOHAMMED ELHIRI

"ÉTUDE ET DÉVELOPPEMENT D'UN CAPTEUR INTELLIGENT
POUR LA DÉTECTION DES VAPEURS DE STYRÈNE"

NOVEMBRE 1991

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

À ISMAËL ELHIRI

SOMMAIRE

Afin d'éviter la lenteur des méthodes de détection des gaz toxiques souvent basées sur l'analyse par chromatographie ou par spectrométrie, on a étudié et développé un capteur intelligent pour la détection des vapeurs de styrène. Ce système permet le contrôle et la détection rapide de ces vapeurs toxiques en fonction des variables environnementales en milieu industriel. Pour simuler ce dernier, on a réalisé un montage expérimental qui a servi à évaluer et à étudier le comportement du capteur de styrène en fonction de la température et de la pression. Pour développer un système capable de prendre des décisions et de communiquer avec des unités externes, on a amélioré le capteur de styrène par l'ajout d'une intelligence locale (microcontrôleur MC68HC11A8), et par l'addition des circuits de conditionnement ainsi que de l'électronique de contrôle et de décision. Ceci a permis d'améliorer la sensibilité, la linéarité, la précision et l'immunité aux interférences du signal détecté.

ABSTRACT

In order to meet the rapid on-site detection of toxic industrial vapors such as styrene, a smart gaz detecting sensor is studied. The detection patterns are obtained as a function of the environmental variables including the pressure and the temperature of the industrial milieu; the later is simulated by a controlled atmosphere chamber. Local intelligence is added to the devised styrene sensor using conditionning, control and decision electronics circuits. These configurations have increased the linearity, the sensibility, the precision and the interferences protection of the detected signals.

REMERCIEMENTS

Si, comme le dit le proverbe, "la culture c'est ce qui reste lorsqu'on a tout oublié", la connaissance serait-elle l'art d'oublier un peu pour savoir plus ? peut-être même, fermerions-nous les yeux pour mieux voir !

Mais avant d'ouvrir les yeux sur ce mémoire, j'aimerais remercier mon directeur de thèse, Monsieur Phieu LE-HUY et mon co-directeur, Monsieur JAMES AGBEBAVI, pour leur encadrement, leur disponibilité ainsi que pour leur leadership scientifique dont j'ai pu bénéficier.

Je n'oublie pas M. Daoud AIT KADI et M. Demagna KOFFI, qui ont toujours su me soutenir lors de mes moments de découragement. Leur détermination et leur enthousiasme ont été un facteur de motivation pour l'accomplissement de ce travail.

Je tiens à remercier nos techniciens, Monsieur Serge DEBLOIS et Monsieur Reynald GAUVIN, pour leur aide technique tout au long de la réalisation de ce projet.

J'aimerais témoigner ma reconnaissance à toute ma famille, plus particulièrement mes parents et ma femme pour leur soutien moral ainsi que pour leur patience.

Signalons enfin que cette étude a été menée grâce à la subvention RS-89-09 de l'institut de recherches en santé et sécurité au travail du Québec (IRSST).

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE	I
ABSTRACT	II
REMERCIEMENTS	III
TABLE DES MATIERES.....	IV
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
 CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	 1
1.1. CONTEXTE	1
1.2. PROBLÉMATIQUE DE LA RECHERCHE	6
1.3. OBJECTIF DE LA RECHERCHE.....	10
 CHAPITRE 2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	 15
2.1. ASPECTS THÉORIQUES DE LA CARACTÉRISTIQUE	
MÉTROLOGIQUE.....	15
2.1.1. Définition.....	15
2.1.2. Les erreurs de mesure.....	16
2.1.2.1. Erreur systématique.....	17

2.1.2.2. Erreurs aléatoires.....	18
2.1.3. Fidélité-Justesse-Précision.....	19
2.1.4. Etalonnage du capteur	21
2.1.4.1. Etalonnage simple	21
2.1.4.2. Etalonnage multiple.....	22
2.1.4.3. Validité d'un étalonnage répétabilité et interchangeabilité.....	23
2.1.4.4. Limite d'utilisation du capteur	24
2.1.4.5. Sensibilité.....	25
2.1.4.6. Linéarité.....	27
2.1.4.7. Rapidité-Temps de réponse.....	27
2.1.4.8. Finesse	28
2.2. CAPTEURS INTELLIGENTS CONCEPT ET INTÉRÊTS.....	29
2.2.1. Le concept de capteur intelligent.....	29
2.2.2. Constitution des capteurs intelligents	32
2.2.3. Intérêt métrologique.....	38
2.2.4. Intérêt fonctionnel	39
2.2.5. Aspect économique	41
2.3. ASPECT TECHNOLOGIQUE DES CAPTEURS INTELLIGENTS	43
2.3.1. Technique de fabrication.....	43
2.3.1. Classification des capteurs intelligents.....	44
2.3.1.1. Capteurs hybrides.....	45
2.3.1.2. Les capteurs sur le silicium.....	46
2.3.1.3. Les capteurs dans le silicium	47
2.3.2. Applications industrielles et perspectives de	

développement des capteurs intelligents.....	48
2.4. LES CAPTEURS DE GAZ.....	50
2.4.1. Capteurs électrophysiques.....	51
2.4.1.1. Accroissement de la sélectivité.....	58
2.4.1.2. Méthode de variation des paramètres.....	59
A. Filtrage du gaz.....	59
B. Préparation, composition et dopage du capteur	60
C. Variation de la température	60
D. La multidétection.....	61
2.4.2. Capteurs électrochimiques.....	62
2.4.3. Tendances de développement des capteurs de gaz.....	66
 CHAPITRE 3 ÉTUDE DU CAPTEUR DE STYRÈNE.....	68
3.1. CAPTEUR DE STYRÈNE.....	68
3.1.1. Unité alimentation et régulation.....	68
3.2.2. Unité de contrôle du "METER"	69
3.2.3. Unité de contrôle du "SENSOR".....	71
3.2.4. Unité "WARM".....	72
3.2.5. Unité "ALARM"	74
3.2.6. Unité "TIMER".....	75
3.2.7. Possibilité ou nécessité	76
3.2. ÉLÉMENTS NÉCESSAIRES POUR L'ÉTUDE DU CAPTEUR DE STYRÈNE	76
3.2.1. Le montage expérimental.....	77

3.2.1.1. Le jeu des manomètres	78
A. Première étape.....	80
B. Deuxième étape.....	80
C. Troisième étape	81
3.2.1.2. L'injection par seringue	81
A. Première étape.....	82
B. Deuxième étape.....	82
3.2.2. Le capteur de température.....	83
3.2.2.1. Principe de mesure.....	83
3.2.2.2. Caractéristique du capteur.....	83
3.2.3. Le capteur de pression.....	86
3.2.4. Le microcontrôleur MC68HC11A8.....	87
3.2.5. Système de mesure	90
3.3. MÉTHODES DE LINÉARISATION.....	92
3.3.1. Méthode analogique de linéarisation.....	93
3.3.2. Principe des méthodes numériques de linéarisation....	94
CHAPITRE 4 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....	96
4.1. ETALONNAGE DU CAPTEUR DE TEMPÉRATURE.....	96
4.2. ETALONNAGE DU CAPTEUR DE PRESSION.....	102
4.3. ETALONNAGE DU CAPTEUR DE STYRENE	108
4.3.1. Le jeu des manomètres	108
4.3.2. L'injection par seringue.....	110
4.4. LINÉARISATION DU CAPTEUR DE STYRENE.....	113
4.5. ÉTUDE DU CAPTEUR DE STYRENE EN FONCTION DE CERTAINES GRANDEURS D'INFLUENCE.....	117

4.6. DISCUSSIONS.....	120
CHAPITRE 5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	122
RÉFÉRENCES	125
ANNEXES	129
A.1. MÉTHODE ET ALGORITHME DE TRAITEMENT DES DONNÉES DE MULTIDÉTECTION.....	130
A.2. PROGRAMME PERMETTANT DE CALCULER LA VALEUR DE LA CONCENTRATION DES VAPEURS DE STYRENE, DE LA TEMPÉ- RATURE, DE LA PRESSION ET DE LA SORTIE ANALOGIQUE LINÉAIRE	140
A.3. SCHÉMA ÉLECTRIQUE DU SYSTÈME DE MESURE ET DU CAP- TEUR DE STYRÈNE.....	158
A.4. DOCUMENTS TECHNIQUES CONCERNANT LES COMPOSANTS UTILISÉS.....	161

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Recherche et développement sur les capteurs chimiques.....	2
Figure 1.2. Schéma synoptique du capteur intelligent.....	12
Figure 2.1. Principe du capteur intelligent.....	30
Figure 2.2. Constitution possible d'un capteur intelligent.....	33
Figure 2.3. Capteur analogique classique et capteur intelligent numérique	35
Figure 2.4. Architectures possibles.....	42
Figure 2.5. Filament-platine.....	52
Figure 2.6. Pellistor.....	53
Figure 2.7. Semi-conducteur.....	54
Figure 2.8. Principe de la multidétection.....	61
Figure 2.9. Sonde à électrolyte solide. Mesure d'une différence de potentiel.....	63
Figure 2.10. Cellule électrochimique. Mesure d'un courant d'oxydo- réduction.....	65
Figure 3.1. Circuit d'alimentation du capteur.....	69
Figure 3.2. Circuit de contrôle du "METER".....	70
Figure 3.3. Circuit de contrôle du "SENSOR"	71
Figure 3.4. Circuit de l'unité "WARM".....	73
Figure 3.5. Circuit de l'unité "ALARM".....	74
Figure 3.6. Circuit de l'unité "TIMER".....	75
Figure 3.7. Schéma du montage simulant le milieu industriel.....	78
Figure 3.8. Relation résistance-température $R(T)$	85

Figure 3.9. Caractéristique de sortie du capteur de pression.....	87
Figure 3.10. Structure interne du microcontrôleur MC68HC11A8.....	88
Figure 3.11. Carte mémoire du microcontrôleur MC68HC11A8.....	90
Figure 3.12. Système de mesure pour l'étude du capteur de styrène.....	91
Figure 4.1. Conditionneur du capteur de température.....	97
Figure 4.2. Caractéristique de sortie du capteur de température $V_o(T)$	100
Figure 4.3. Erreur de mesure de la température $\Delta T(T)$	102
Figure 4.4. Circuit permettant d'adapter la tension de sortie du capteur de pression.....	103
Figure 4.5. Caractéristique de sortie du capteur de pression $V_o(P)$	106
Figure 4.6. Erreur de mesure de la pression $\Delta P(P)$	107
Figure 4.7. Caractéristique de sortie du capteur de styrène en utilisant le jeu des manomètres $V_o(C_s)$	110
Figure 4.8. Caractéristique de sortie du capteur de styrène en utilisant l'injection par seringue $V_o(C_s)$	112
Figure 4.9. Circuit d'amplification associé au capteur de styrène.....	114
Figure 4.10. Caractéristique de sortie du capteur de styrène après amplification.....	115
Figure 4.11. Système de linéarisation numérique.....	115
Figure 4.12. Linéarisation du capteur de styrène.....	117
Figure 4.13. Caractéristique de sortie du capteur de styrène en présence de l'hydrogène.....	118
Figure 4.14. Evolution de la concentration des vapeurs de styrène en fonction du temps.....	119

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1. Fabrication de film épais	46
Tableau 3.1. Relation résistance-température $R(T)$	84
Tableau 4.1. Relation température-tension $V_o(T)$	99
Tableau 4.2. Erreurs absolues de mesure de la température.	101
Tableau 4.3. Relation pression-tension $V_o(T)$	104
Tableau 4.4. Erreurs absolues de mesure de la pression.	106
Tableau 4.5. Résultats obtenus en utilisant le jeu des manomètres.	109
Tableau 4.6. Résultats obtenus en utilisant l'injection par seringue.....	111

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE

Pendant une trentaine d'années de recherche, le capteur chimique a subi une grande amélioration. Aussi, a-t-il pris racine dans la vie humaine et industrielle comme une future technologie moderne. Plusieurs sortes de capteurs chimiques étaient proposés avant 1960, et vingt ans plus tard de nouveaux dispositifs de détection ont fait leur apparition, comme par exemple le transistor à effet de champ sensible aux ions (ISFET). En même temps, la commercialisation de ces nouveaux capteurs devenait possible. Cette période peut être considérée comme la première étape des capteurs chimiques. Ceci a conduit à la première conférence internationale sur le capteur chimique qui a eu lieu à Fukuoka au Japon en 1983 [1]. Le développement et la recherche dans le domaine des capteurs chimiques dans le futur, suivra un chemin de perfectionnement, de combinaison et de systématisation. Quant à l'amélioration des capteurs chimiques, elle est rendue possible grâce à l'excellence des matériaux de détection et la recherche dans la micro-fabrication. Les deux objectifs visés par cette technique sont : la miniaturisation et l'économie de l'énergie. Quant à la combinaison, la grande performance du capteur fabriqué par l'intégration de plusieurs transducteurs avec des caractéristiques de détection variées et un microprocesseur augmentera la sensibilité et la sélectivité de la

détection du gaz soumis à la mesure. Il y a un sérieux défaut dans les systèmes de capteur courant c'est-à-dire, fausses alarmes ou défaillance de l'alerte. Celui-ci peut être résolu par une double ou triple vérification du système. Ceci peut se faire par un contrôle interne de tous les éléments constituant le capteur. L'ajout d'un microprocesseur fera progresser la systématisation. Le contrôle automatique des machines ou des instruments de surveillance des systèmes, des systèmes d'alarmes et d'autres systèmes de contrôle améliorera la sécurité, les commodités, et la convenance des appareils domestiques. La stratégie générale de la recherche sur les capteurs chimiques est résumée dans la figure 1.1.

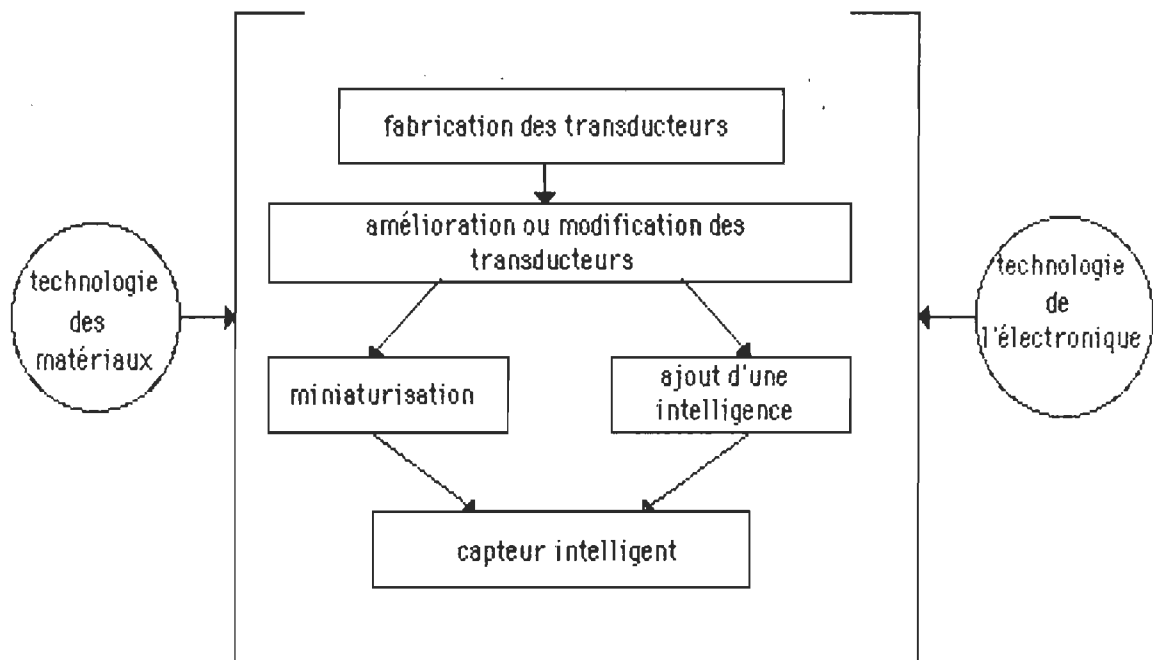


Figure 1.1. Recherche et développement sur les capteurs chimiques.

Comme le montre cette figure, la recherche sur les matériaux et la technologie d'interface électronique sont indispensables au développement des capteurs chimiques. Ces deux domaines doivent être étroitement combinés dans chaque processus qui a pour but de produire un système de capteur supérieur. Pour l'avancement de la recherche sur les capteurs, il est important d'établir un concept qui servira de guide concernant la fabrication du capteur et atteindra une compréhension exacte du mécanisme de détection. Autrement, les résultats obtenus par l'arrangement d'expériences a démontré que cette méthode est la moins utilisé dans le développement des capteurs chimiques.

En général, un capteur chimique ne fait pas seulement la conversion du mesurande en un signal électrique, mais il introduit un traitement du signal plus sophistiqué. Les systèmes de capteur, tels que le système d'injection électronique de l'essence pour les voitures et les systèmes de sécurité domestiques ont connu un grand développement. L'utilisation des microprocesseurs ou des microcontrôleurs est la clef de l'orientation vers la systématisation. Cette dernière, ne résultera pas dans la miniaturisation, mais aussi dans une augmentation de la conservation de l'énergie, la fabrication à coût réduit et une nette amélioration des performances. Les travaux d'Ikegami [2] et Müller [3] en Allemagne sont brièvement cités comme un exemple d'approche au capteur intelligent. Ils ont essayé d'identifier une espèce de gaz par le traitement des signaux envoyés par un ensemble d'éléments de détection. Il y a aussi le groupe de recherche de la compagnie Hitachi [2] qui propose un système

électronique composé d'un capteur intégré et d'un microcontrôleur. Six transducteurs différents sont fabriqués sur un substrat d'aluminium. Chaque élément n'est pas sélectif, mais il est sensible à un certain nombre d'espèces de gaz. L'existence d'une sorte de gaz peut être identifiée par un algorithme de traitement des données effectué par le microcontrôleur. Le système de capteur de Müller [3] est, en principe, similaire à celui du groupe Hitachi, bien que l'application soit étendue à une atmosphère contenant plusieurs espèces de gaz. Stetter [4] a développé un système de capteurs pour l'utilisation pratique où il a employé des algorithmes pour l'identification de 100 composantes. Dans son système, 16 sortes d'éléments de détection sont intégrés et les propriétés cinétiques sont ajoutées aux paramètres d'identification comme conditions initiales pour démarrer l'algorithme de traitement des données.

Le développement et la recherche dans le domaine de la micro-électronique [5], ainsi que les exigences demandées en ce qui concerne la qualité des mesures et des informations dans les systèmes de productions industriels [6], ont donné naissance à une nouvelle génération de capteurs nommés "capteurs intelligents" [7]. Ces derniers combinent le traitement des données électriques qui sont exécutées normalement par une unité de traitement extérieure et le transducteur sur la même structure. Malheureusement, le domaine des capteurs est nouveau. Il est parfois flou, et sa définition ne demeure pas très explicative. La combinaison du transducteur et de l'électronique sur la même structure est parfois qualifiée de capteur intégré [8]. Ceci, tant que le terme "intelligent" est

reservé aux équipements qui comportent quelques fonctions logiques et/ou prennent certains types de décisions [7]. A travers cette définition, un capteur intégré qui inclut le conditionneur du signal électrique et qui transforme le mesurande en une échelle de tension électrique est non intelligent [8]. D'autres groupes, maintiennent que chaque capteur qui combine le transducteur et l'électronique sur la même structure mérite le terme "intelligent" [6,7]. Dans ce sens, le capteur intelligent n'a pas à être intégré. Le terme "hybride" [8] peut-être appliqué dans ce cas . Plus généralement, les capteurs intelligents ont l'habilité de détecter des erreurs dans leurs propres opérations, ce qui conduit à des systèmes de capteurs qui fonctionnent en boucle fermée. Il n'est pas difficile d'imaginer la signification de ces avantages dans les applications qui requièrent une très grande fiabilité. Par exemple, un moniteur de coeur qui n'a pas besoin d'interruption externe durant l'évaluation et l'ajustement du système [5].

Finalemt, il est bien connu que les variations de la température affectent les performances des capteurs. Il y a plusieurs façons d'effectuer la compensation, certaines ont plus de succès que d'autres. En électronique intégrée, le circuit de compensation de la température est automatiquement à la même température que l'élément de détection qui est compensé [5,7,9]. Cette capacité d'autodiagnostic commence à faire son apparition pour être incorporée à l'intérieur des capteurs, et continue d'être un grand défi technologique chez les fabricants. La division Micro

Switch de Honeywell (Freeport, IL) est entièrement engagée dans ce domaine [9].

1.2. PROBLÉMATIQUE DE LA RECHERCHE

L'incendie, en septembre 1988, des barils de polychlorobiphenyl (PBC) à Saint-Basile-Le-Grand, Canada, n'a fait qu'accentuer l'épineux problème des détections rapides des toxines et polluants toxiques auxquels sont exposées des populations. Les études actuelles couvrant les polluants gazeux dans l'air et dans les précipitations [11], le méthane [12], les aérosols [13], ou les oxydes de soufre [14] sont monnaie courante mais s'occupent surtout des transports atmosphériques de ces déchets sur de longues distances.

Le styrène, c'est un solvant organique liquide et toxique, abondamment utilisé dans l'industrie qui fabrique des produits en plastiques renforcé de fibre de verre [15]. Vous avez fait l'acquisition récemment d'un bateau, d'un bain tourbillon, d'une voiture dernier cri ? Alors, vous possédez probablement une chose faite à base de styrène. Surtout, pas de panique ! Une fois coulé, moulé, le styrène est inoffensif.

Le dégagement des vapeurs du styrène dans l'air peut se produire au cours des opérations de synthèse de styrène et de ses polymères [11], pendant la fabrication des produits en plastiques renforcé de fibre de verre [15], lors de bris de machines ou d'épandages accidentels [16] ou durant le

travail des matériaux à base de polymères de styrène [16]. L'absorption de styrène, par les travailleurs des industries concernées, se fait par respiration sous forme de vapeurs [17] et par contact cutané sous forme liquide [18]. L'émanation de styrène contamine donc l'air ambiant des usines et contribue aussi à la pollution atmosphérique à l'extérieur des industries en question. En effet, de très nombreuses recherches ont montré que, au fil du temps, l'exposition au styrène (substance qui pénètre dans l'organisme par la peau et les voies respiratoires), même à des valeurs se rapprochant de la norme actuellement en vigueur, peut entraîner, chez les travailleurs et les travailleuses qui y sont exposés, une encéphalopathie toxique [19]. L'infection, qui met du temps à se manifester, se caractérise essentiellement par des changements de la personnalité, des pertes de mémoire, de la difficulté à se concentrer à des problèmes de motricité. Au dernier stade, une personne très atteinte affiche des symptômes qui peuvent faire penser à la démence précoce [19]. Et les dommages cérébraux sont malheureusement irréversibles. Au Québec, la concentration moyenne (cinq jours de travail par semaine à raison de huit heures par jour) admissible est de 100 ppm (partie par million, ou 420 milligrammes par mètre cube) [19]. Cette norme est quatre fois plus basse en Suède et deux fois plus aux États-Unis [19].

Dans la Beauce, près de 400 travailleurs et travailleuses œuvrent dans des industries qui fabriquent des produits en plastique renforcé de fibre de verre et sont donc régulièrement exposés au styrène[19]. Ce type d'industrie étant en plein essor au Québec, on peut

présumer que quelques milliers d'autres travailleurs manipulent régulièrement ou périodiquement cette substance. Au Québec, l'exposition au styrène est à déclaration obligatoire en vertu de la loi sur la protection de la santé publique. La surveillance des travailleurs exposés se fait en mesurant le taux d'acide mandélique présent dans leurs urines [19]. À l'IRSST, il y a chaque année de 800 à 1200 échantillons d'urines de travailleurs exposés au styrène qui sont analysés [19]. Même si ces tests donnent une assez bonne image de l'exposition récente au styrène qu'a pu subir un travailleur, ils n'éclairent pas suffisamment sur les effets que peut avoir cette substance sur la santé du travailleur. Le métabolisme du styrène dans l'organisme de l'être humain se traduit en la présence d'acides phenylglyoxylique et mandélique dans l'urine [20] et de styrène glycol dans le sang [21]. Cependant la grande partie du styrène infiltré dans le système biologique s'accumule dans le foie, les reins et dans les tissus adipeux [22]. Alors, un taux élevé d'acide mandélique dans l'urine d'un travailleur est un indicateur fiable de surexposition [19].

Les méthodes de détection du styrène sont basées sur l'analyse par chromatographie en phase gazeuse [23,24] en phase liquide [25] ou par spectrométrie [22]. Ces analyses sont très fiables mais elles utilisent des échantillons prélevés sur les lieux ou des échantillons de produits biotransformés dans le corps des travailleurs [26]. Ces méthodes donnent des résultats après de longs délais et l'échantillonnage est différent selon les pièges utilisés [27]. L'analyse par spectrométrie au laser sur les lieux promet [28], mais la technologie reste à développer. Il est clair que l'en-

semble des systèmes de détection employés est grand et constitue des solutions a posteriori. Il devient ainsi indispensable de pouvoir détecter rapidement, in situ, les vapeurs de styrène avant une exposition prolongée des travailleurs. Les remèdes proposés au problème de styrène sont orientés vers une ventilation continue des lieux d'émanation ou de concentration [29]. Les procédés de détection existants étant longs et offrant seulement des solutions a posteriori, la venue des capteurs intelligents pourrait être exploitée.

Les capteurs sont à la base de tous les procédés de détection qui, en général, ne comprennent que le capteur et le transducteur électrique. Par ailleurs, les capteurs intelligents intègrent les circuits de conditionnement, l'électronique de contrôle et de décision ainsi que les périphériques [30,31]. De plus, les contraintes d'opération et les consignes pourraient être modifiées par liaisons de communication. Les informations disponibles sous forme numérique deviennent directement manipulables par ordinateur. Les avantages offerts par les capteurs intelligents sont nombreux, notamment l'amélioration de sensibilité, de linéarité, de précision et d'immunité aux interférences; la standardisation du format des signaux de sortie, la réduction en nombre et en dimension des composants [30,32,33]. Les autres avantages inhérents sont l'accroissement de la fiabilité, de la vitesse de la réponse et l'expansion de la gamme d'opération. Concernant la flexibilité d'exploitation, les capteurs intelligents offrent la possibilité de la multidétection, d'implantation de la redondance et la capacité d'autodiagnostic. Ceci conduit direc-

tement aux systèmes de contrôle en boucle fermée à haute performance. Plus encore, les capteurs adressables pourraient être envisagés dans les applications requérant la modification du système central des capteurs de détection. Il importe de pouvoir exploiter cette nouvelle technologie dans la détection des polluants toxiques, en particulier le styrène dans l'air.

1.3. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Cette recherche a pour but l'étude et le développement d'un capteur intelligent et fiable de détection de vapeurs de styrène en milieu industriel. L'accent sera mis sur :

- l'analyse des techniques plausibles de détection des gaz toxiques;
- le choix du capteur de styrène,
- la réalisation du montage simulant le milieu industriel;
- l'étude du capteur de styrène;
- l'intégration de l'intelligence.

Le choix du capteur de styrène sera basé sur l'analyse des techniques plausibles de détection qui sera exposée au chapitre 2. La méthode de détection des vapeurs de styrène doit être orientée vers le principe de la multidétection, car le styrène est toujours présent dans un mélange d'autres substances organiques.

Pour tester le comportement du capteur de styrène dans le milieu industriel, la réalisation d'un montage expérimental sera fait pour tester la méthode de détection utilisée; à ce stade on tiendra aussi compte de la détection in situ, afin que les données recueillies en mode dynamique permettent de vérifier l'utilisation potentielle d'un tel détecteur dans le contrôle d'un procédé :

- des concentrations de 0 à 300 ppm dans l'air seront balayées;
- des mélanges avec des hydrocarbures enclins à des interférences avec le styrène seront aussi testés. Les échantillons seront comparés en terme de réponses à la chromatographie en phase gazeuse.

La figure 1.2 représente le schéma synoptique du capteur intelligent. Elle est divisée en deux blocs:

- un bloc capteur contenant l'élément de détection;
- un bloc contenant l'électronique de contrôle et de décision.

Le signal détecté, disponible à la sortie du transducteur, est de faible niveau et contient des informations parasites. A ce stade, la conception du circuit de mise en forme exige d'une part, l'utilisation de composants à grande immunité par rapport au bruit, et d'autre part des cir-

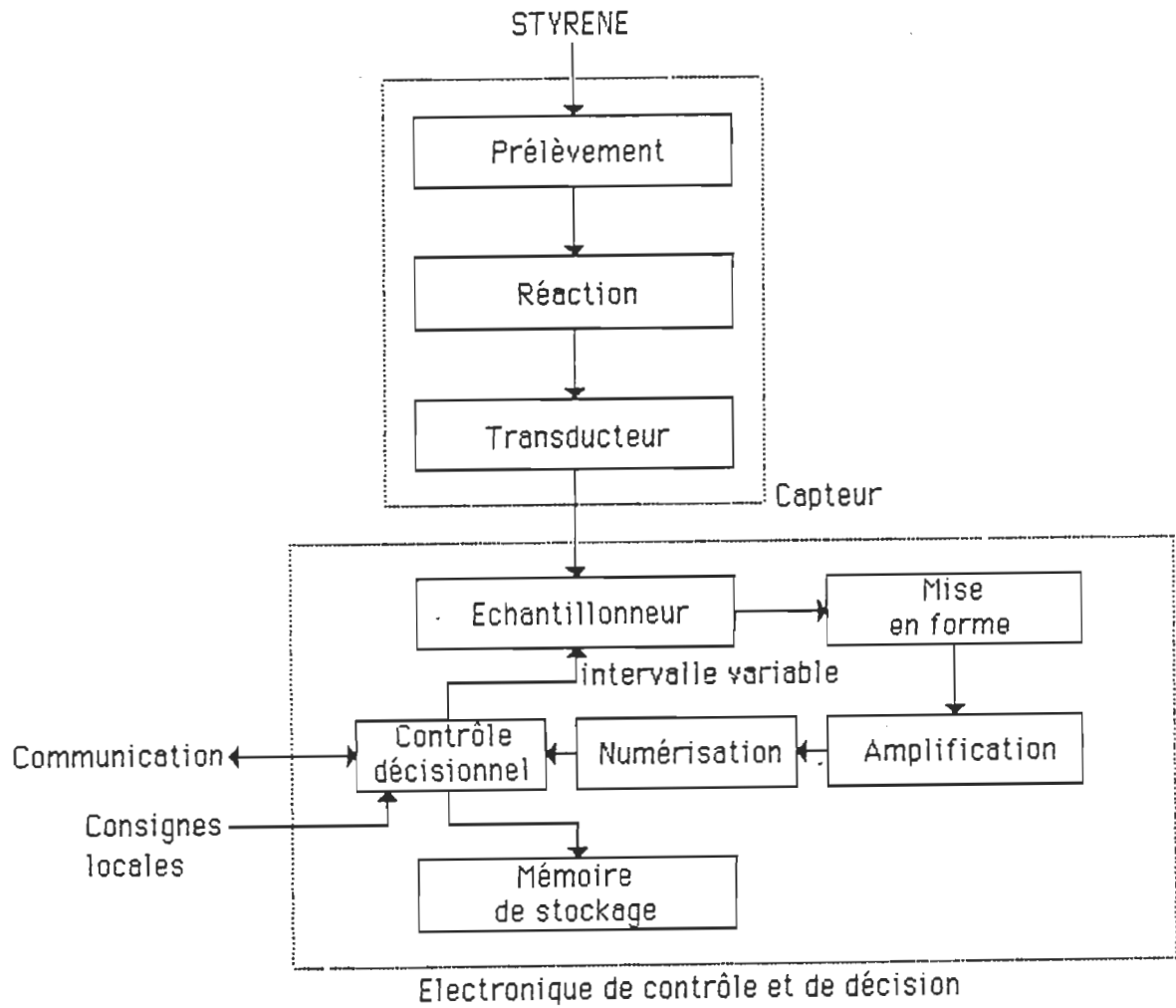


Figure 1.2. Schéma synoptique du capteur intelligent

cuits de pré-traitement extrayant spécifiquement les informations utiles en plus des circuits de linéarisation de la caractéristique de transfert du capteur. L'utilisation de la redondance active des circuits de pré-traitement peut servir à l'identification des gaz toxiques par empreinte, celle du styrène dans le cas présent, et à l'amélioration de la fiabilité de fonctionnement du capteur, évitant ainsi les fausses détection à faible

niveau. Les composants à grande largeur de bande de réponse doivent être employés en vue de l'expansion de la gamme de détection. Afin de réduire les dimensions de l'alimentation, l'utilisation des composants CMOS de faible consommation en puissance est prévue.

Les signaux disponibles à la sortie des circuits de pré-traitement, servant à l'identification du gaz toxique, doivent être amenés à un niveau manipulable par étage d'amplification. Les circuits d'adaptation réaliseront l'interface avec l'étage de numérisation. L'entrée de cette dernier est constitué en un ensemble de circuits de numérisation à intervalle variable selon les consignes locales imposées ou pré-programmées en fonction des paramètres environnementaux et du gaz toxique à détecter. Le traitement numérique des signaux, effectué par le microcontrôleur local, permet l'identification des gaz toxiques et de leur concentration par l'empreinte numérique. La standardisation de ce format numérique est conditionnée par la stratégie de codage et de protocole de communication. De plus, ce même contrôleur supervise le fonctionnement global du capteur intelligent et pourrait recevoir des ordres provenant du contrôleur central.

A l'étape de codage et de stockage d'informations, nous envisageons de développer une stratégie de codage efficace des empreintes numériques et de stockage d'informations selon le protocole de communication choisi, et éventuellement, la topologie des capteurs intelligents en

vue de l'implantation dans un système de contrôle à boucle fermée et à multidétection.

A l'étape de communication et d'affichage local, nous procéderons à l'étude de l'interface de communication choisie en fonction du protocole de communication d'informations et de la procédure d'auto-diagnostic. L'affichage local de certains paramètres sera exploré. Afin d'accroître la gamme de réponse, d'améliorer la fiabilité et de réduire les dimensions totales du capteur intelligent, tous les circuits utilisés pour l'incorporation de l'intelligence doivent être de grande immunité aux bruits, à large bande et de faible consommation en puissance.

CHAPITRE 2

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1. LES ASPECTS THÉORIQUES DE LA CARACTÉRISTIQUE MÉTROLOGIQUE

2.1.1. Définition

La grandeur physique, objet de la mesure : déplacement, température, pression, etc... est désignée comme le mesurande et représentée par m . L'ensemble des opérations expérimentales qui concourent à la connaissance de la valeur numérique du mesurande constitue son mesurage. Lorsque le mesurage utilise des moyens électroniques de traitement du signal, il est nécessaire de produire à partir du mesurande une grandeur électrique qui en soit une représentation aussi exacte que possible : ceci signifie que la grandeur électrique et ses variations apportent toute l'information nécessaire à la connaissance du mesurande. Le capteur est le dispositif qui soumis à l'action d'un mesurande non électrique présente une caractéristique de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) désignée par S et qui est fonction du mesurande [10] :

$$S = F(m) \quad (2.1)$$

où S est la grandeur de sortie ou réponse du capteur, m est la grandeur

d'entrée ou excitation. La mesure de S doit permettre de connaître la valeur de m . La relation (1) résulte dans sa forme théorique des lois physiques qui régissent le fonctionnement du capteur et dans son expression numérique de sa construction (géométrie, dimensions), des matériaux qui le constituent et éventuellement de son environnement et de son mode d'emploi (température, alimentation). Pour tout capteur la relation (1) sous sa forme numériquement exploitable est explicitée par étalonnage : pour un ensemble de valeurs de m connues avec une exactitude suffisante, on mesure les valeurs correspondantes de S ce qui permet de tracer la courbe d'étalonnage. Cette dernière, à toute valeur mesurée de S , permet d'associer la valeur de m qui la détermine.

Le capteur, premier élément de la chaîne de mesure est la source déterminante du signal électrique que le reste de la chaîne doit traiter et exploiter. L'adaptation du capteur et de la chaîne de mesure implique que celle-ci n'ajoute pas au signal initial des incertitudes ou limitations supérieures à celles apportées par le capteur. C'est donc de la qualité du capteur que dépendent en premier lieu, d'une part, la plus ou moins bonne concordance entre valeur mesurée et valeur vraie du mesurande, et d'autre part, les limites de l'incertitude sur la valeur mesurée.

2.1.2. Les erreurs de mesure

Les seuls mesurandes dont les valeurs sont parfaitement connues sont les grandeurs étalons primaires puisque leurs valeurs sont

fixées par convention. La valeur de tout autre mesurande ne peut être connue qu'après traitement par une chaîne de mesure. C'est la valeur vraie du mesurande qui détermine l'excitation du capteur, mais l'expérimentateur n'a accès qu'à la réponse globale de la chaîne de mesure : cette réponse, exprimée en unités du mesurande, est la valeur mesurée. L'écart entre la valeur mesurée et valeur vraie est l'erreur de mesure : celle-ci est due en particulier aux imperfections de la chaîne de mesure qui dégradent l'information du signal au cours de son traitement. L'erreur de mesure ne peut qu'être estimée : la valeur vraie du mesurande ne peut donc être connue. Cependant, une conception rigoureuse de la chaîne de mesure permet de réduire l'erreur de mesure et donc l'incertitude sur la valeur vraie.

2.1.2.1. Erreur systématique

Pour une valeur donnée du mesurande, une erreur systématique est soit constante, soit à variation lente par rapport à la durée de mesure : elle introduit donc un décalage constant entre valeur vraie et valeur mesurée. Les erreurs systématiques ont généralement pour cause une connaissance erronée ou incomplète de l'installation de mesure ou sa mauvaise utilisation. L'existence possible d'une erreur systématique peut être établie par l'écart qui apparaîtrait entre les valeurs les plus probables tirées de deux séries de mesurage portant sur le même mesurande et effectuées par des méthodes et instruments différents.

Les causes fréquentes d'erreurs systématiques sont décrites comme suite :

- erreurs sur la valeur d'une grandeur de référence,
- erreurs sur les caractéristiques du capteur,
- erreurs dues au mode ou aux conditions d'emploi,
- erreurs dans l'exploitation des données brutes de mesure.

2.1.2.2. Erreurs aléatoires

L'apparition de ces erreurs comme leur amplitude et leur signe sont considérés comme aléatoire. Certaines des causes peuvent être connues mais les valeurs des erreurs qu'elles entraînent au moment de l'expérience sont inconnues [10]. Parmi les diverses causes possibles d'erreurs accidentelles il y a :

- erreurs liées sur caractéristiques instrumentales,
- erreurs dues aux signaux parasites,
- erreurs dues à des grandeurs d'influence.

L'importance de ces erreurs peut dans certains cas être réduite par des dispositifs ou des méthodes expérimentales appropriées :

- protection de la chaîne de mesure contre des causes d'erreurs,
- utilisation de modes opératoires judicieux (méthode de mesure différentielle, élimination de l'influence des inductions parasites du secteur par convertisseur à double rampe, extraction d'un signal du bruit par détection synchrone, corrélation).

2.1.3. Fidélité–Justesse–Précision

Les erreurs aléatoires entraînent une dispersion des résultats lors de mesures répétées. Cependant leur traitement statique permet de rendre la plus probable de la grandeur mesurée, et de fixer les limites de l'incertitude. Lorsque le mesurage d'une même valeur (inconnue) du mesurande a été répété n fois, donnant les résultats : m_1, m_2, \dots, m_n , une estimée de la valeur moyenne M est donnée par définition :

$$M(n) = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{n} \quad (2.2)$$

Une caractéristique de la dispersion de ces résultats est donnée par l'écart type σ dont l'estimé le plus probable est :

$$\sigma = \sqrt{\frac{(m_1 - M(n))^2 + (m_2 - M(n))^2 + \dots + (m_n - M(n))^2}{(n-1)}} \quad (2.3)$$

Lorsque les erreurs aléatoires affectant les différents mesurages sont indépendantes, la probabilité d'apparition des différents résultats satisfait habituellement à la loi normale dite encore loi de Gauss.

La fidélité est la qualité d'un appareillage de mesure dont les erreurs aléatoires sont faibles : elle se traduit par des résultats de

mesurage groupés autour de leur valeur moyenne. L'écart type dont l'importance reflète la dispersion des résultats est souvent considéré comme l'erreur de fidélité : il permet ainsi une appréciation quantitative de la fidélité. La valeur du mesurande la plus probable telle qu'elle résulte d'un grand ensemble de mesures peut être connu avec une faible marge d'incertitude tout en étant éloignée de la vraie valeur du mesurande si des erreurs systématiques importantes se sont superposées aux erreurs aléatoires.

La justesse est la qualité d'appareillage de mesure dont les erreurs systématiques sont réduites : la valeur la plus probable du mesurande qu'un tel appareillage permet de déterminer est alors très proche de la vraie valeur.

L'exactitude qualifie l'aptitude de l'appareillage de mesure à donner des résultats qui, individuellement, sont proches de la valeur vraie du mesurande : un appareillage précis est donc à la fois fidèle et juste. L'exactitude peut être spécifiée numériquement par l'erreur de limite qui, compte tenu de toutes les causes d'erreur (systématiques et aléatoires) délimite l'intervalle autour de la valeur mesurée, à l'intérieur duquel on est assuré de trouver la vraie valeur.

La mesure d'une grandeur physique avec une exactitude donnée exige :

- le choix d'une méthode de mesure;

- la sélection du capteur approprié;
- la conception et la réalisation de la chaîne de mesure associée.

2.1.4. Etalonnage du capteur

L'étalonnage du capteur comprend l'ensemble des opérations qui permettent d'explicitier, sous forme graphique ou algébrique, la relation entre les valeurs du mesurande et celle de la grandeur électrique de sortie et ceci, compte tenu de tous les paramètres additionnels susceptibles de modifier la réponse du capteur.

Ces paramètres additionnels peuvent être, soit des grandeurs physiques liées au mesurande et aux quelles le capteur est sensible (sens et vitesse de variation du mesurande, propriétés physiques du support matériel du mesurande), soit des grandeurs physiques, indépendantes du mesurande, aux quelles le capteur est soumis pendant son utilisation et qui peuvent modifier sa réponse (grandeurs d'influence d'ambiance, comme la température et l'humidité, ou grandeurs d'influence d'alimentation).

2.1.4.1. Etalonnage simple

Il s'applique à une mesurande défini par une grandeur physique scalaire et à un capteur non sensible ou non soumis à des grandeurs d'influence. Il s'agit en particulier de mesurandes statiques, c'est-à-dire à valeur constante; par exemple : mesure d'une distance fixe à l'aide d'un

capteur potentiométrique dont l'indication ne dépend pas de la température; mesure d'une force constante (pesage) au moyen de jauges compensées en température; mesure d'une température stable à l'aide d'un thermocouple.

Dans ces conditions, l'étalonnage consiste à associer à des valeurs parfaitement déterminées du mesurande les valeurs correspondantes de la grandeur électrique de sortie. Donc l'étalonnage s'effectue par un seul type d'expériences et par l'une des procédures suivante [10] :

- étalonnage direct ou absolu;
- étalonnage indirect ou par comparaison.

2.1.4.2. Etalonnage multiple

Lorsque le mesurande à lui seul ne permet pas de définir la réponse du capteur, il faut que soit précisée, par une série d'étalonnages successifs l'influence de chacun des paramètres actifs additionnels. Dans le cas où le capteur est constitué de composants susceptibles de présenter de l'hystérésis, mécanique ou magnétique, la valeur de la grandeur de sortie dépend non seulement de la valeur actuelle du mesurande mais aussi de la suite de ses valeurs antérieures. L'obtention d'une courbe d'étalonnage parfaitement définie exige alors une procédure d'étalonnage dans laquelle le capteur se trouve soumis à une succession ordonnée et spécifiée de valeurs du mesurande. La procédure généralement employée est la suivante :

- remise à zéro du capteur : le mesurande et la grandeur de sortie ont les valeurs correspondant à l'origine de leurs variations, par exemple : $m=0$, $S=0$;
- relevé de la grandeur de sortie, d'abord pour une suite croissante de valeurs du mesurande puis, pour une suite de valeurs décroissant depuis la valeur maximale atteinte précédemment.

Une procédure semblable doit être appliquée vis-à-vis des grandeurs d'influence. Si la température modifie la réponse du capteur, on effectue une série d'étalonnages, chacun étant réalisé à température constante et l'opération répétée pour diverses températures réparties dans la plage d'utilisation possible. On agit de même pour toute grandeur d'influence.

2.1.4.3. Validité d'un étalonnage : répétabilité et interchangeabilité

La confiance que l'on peut accorder aux résultats d'un étalonnage doit être évaluée lorsque ces derniers sont utilisés pour l'exploitation de données fournies, soit par le capteur ayant été étalonné, soit par un capteur de même fabrication mais n'ayant pas fait l'objet d'un étalonnage individuel.

La répétabilité est la qualité du capteur qui assure l'utilisateur de l'identité de la grandeur de sortie, dans les limites spécifiées, chaque fois que ce même capteur est utilisé dans des conditions identiques : même mesurande et mêmes paramètres additionnels. L'erreur de répétabilité est déterminée en effectuant au moins deux étalonnages successifs, elle trouve son origine principale dans les erreurs aléatoires faites lors de l'étalonnage.

L'interchangeabilité d'une série de capteurs d'un même type est la qualité de cette série qui garantit à l'utilisateur des résultats identiques, aux tolérances près, chaque fois qu'un quelconque capteur de cette série est utilisé dans des conditions identiques. L'interchangeabilité résulte :

- d'une part, de la rigueur des procédés de fabrication (choix des matériaux et assemblage);
- d'autre part des contrôles en fin de fabrication qui permettent de trier les capteurs satisfaisant aux tolérances imposées.

2.1.4.4. Limite d'utilisation du capteur

Lorsque les niveaux des contraintes mécaniques, thermiques ou électriques auxquelles un capteur est soumis dépassent des seuils définis, les caractéristiques du capteur changent par rapport à ce qu'elles étaient connues par étalonnage préalable ou spécification du constructeur. Il est

donc indispensable que l'utilisateur soit averti des diverses limites d'utilisation d'un capteur et des risques qu'il encourt à les dépasser [10].

2.1.4.5. Sensibilité

C'est une spécification déterminante dans le choix d'un capteur, de façon générale la sensibilité S est définie, autour d'une valeur m_i constante du mesurande, par le rapport de la variation Δs de la grandeur de sortie à la variation Δm du mesurande qui lui a donné naissance [10]:

$$S = \left[\frac{\Delta s}{\Delta m} \right]_{m=m_i} \quad (2.4)$$

La valeur de la sensibilité, dans des conditions d'emploi spécifiées est généralement fournie par le constructeur, elle permet à l'utilisateur :

- d'estimer l'ordre de grandeur de la réponse du capteur; connaissant l'ordre de grandeur des variations du mesurande;
- de choisir le capteur de façon que la chaîne de mesure dans son ensemble satisfasse aux conditions de mesure imposées.

L'unité en laquelle est exprimée S résulte du principe qui est à la base du capteur et des ordres de grandeurs mis en jeu : $\Omega / ^\circ\text{C}$ pour une résistance thermométrique, $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$ pour un couple thermoélectrique, par exemple.

Pour divers capteurs basés sur un même principe physique, la valeur numérique de S peut dépendre du choix des matériaux, de leur dimensionnement ou de leur mode d'assemblage. La sensibilité peut en outre être fonction de paramètres additionnels lorsque ces derniers influencent la réponse du capteur. La température est un paramètre important, particulièrement pour les capteurs constitués d'éléments semi-conducteurs : c'est le cas, par exemple, pour la sensibilité d'un phototransistor ou d'une jauge d'extensométrie semiconductrice [5,7].

L'influence de la température peut aussi être spécifiée de façon plus globale par l'erreur sur la sensibilité qui est l'écart maximal, en % de la sensibilité nominale lorsque la température varie dans les limites indiquées.

L'étalonnage statique consiste à relever, pour différentes valeurs constantes du mesurande m_i , des valeurs correspondantes de la grandeur électrique s_i , lorsque celle-ci a atteint son régime permanent. La caractéristique statique est la traduction graphique de cet étalonnage. Le point de fonctionnement Q_i du capteur est le point de la caractéristique statique correspondant aux valeurs associées de m_i et s_i .

La définition générale de la sensibilité donnée précédemment conduit à définir la sensibilité en régime statique, en un point de fonctionnement Q_i , comme le rapport de l'incrément Δs à l'incrément Δm

qui le provoque : la sensibilité en régime statique est donc égale à la pente de la caractéristique au point de fonctionnement, lorsque cette caractéristique n'est pas une droite, la sensibilité dépend du point de fonctionnement.

2.1.4.6. Linéarité

Un capteur est dit linéaire dans une plage déterminée du mesurande si sa sensibilité y est indépendante de la valeur du mesurande. Dans la plage de linéarité du capteur, le signal électrique tout au long de la chaîne est proportionnel à la variation du mesurande dès lors que les divers dispositifs associés au capteur (pont, amplificateurs) sont eux-mêmes linéaire. Il en résulte alors une plus grande simplicité dans le traitement du signal permettant d'accéder à la valeur numérique de la variation du mesurande. L'intérêt de la linéarité est tel que, lorsque le capteur n'est pas linéaire on se trouve amener à inclure dans la chaîne de mesure des dispositifs de correction - dits de linéarisation - dont le rôle est de rendre le signal proportionnel aux variations du mesurande [10].

2.1.4.7. Rapidité-Temps de réponse

La rapidité est la spécification d'un capteur qui permet d'apprécier de quelle façon la grandeur de sortie suit dans le temps les variations du mesurande. La rapidité est donc liée au temps nécessaire pour que la contribution du régime transitoire à la grandeur de sortie

devienne négligeable dans des conditions de précision définies. Or la forme du régime transitoire est déterminée indépendamment de la loi de variation du mesurande : elle ne dépend que des propriétés des éléments du système directement associées au capteur. Une spécification de la rapidité pour une variation particulière du mesurande permet donc son appréciation indépendamment de la loi réelle de variation du mesurande étudié. La grandeur utilisée pour définir quantitativement la rapidité est le temps de réponse : c'est l'intervalle de temps qui s'écoule après une variation brusque (échelon) du mesurande jusqu'à ce que la variation de la sortie du capteur ne diffère plus de sa valeur finale d'un écart supérieur à une limite conventionnellement fixée. Un temps de réponse doit donc toujours être spécifié avec l'écart auquel il correspond.

2.1.4.8. Finesse

C'est une spécification qui permet à l'utilisateur d'estimer l'influence que la présence du capteur et de ses liaisons peut avoir sur la valeur du mesurande. La finesse est définie par la valeur d'une grandeur physique qui dépend de la nature du capteur et qui détermine sa réaction sur le mesurande [10]. L'influence du capteur sur le mesurande dépend non seulement des caractéristiques du capteur mais aussi de celle du milieu ou de la structure qui sont le support du mesurande. La finesse d'un capteur donné ne peut donc être appréciée qu'en fonction de ses conditions effectives d'utilisation.

2.2. CAPTEURS INTELLIGENTS : CONCEPT ET INTÉRÊTS

Les possibilités technologiques de la micro-électronique ont contribué à l'apparition du concept de capteur intelligent. En dotant le transmetteur associé aux transducteurs d'un organe de calcul interne (microprocesseur ou autre), les performances métrologiques et fonctionnelles d'un capteur sont considérablement accrues. Les caractéristiques nouvelles sont principalement un gain important sur la précision et la crédibilité des mesures, le traitement de signaux numériques et la possibilité de communication avec un réseau local ou à un ordinateur. L'avènement prochain de ce type d'instrumentation constitue un enjeu technologique et économique important, dans le domaine du procédé, de la productique et de la robotique particulièrement.

2.2.1. Le concept de capteur intelligent

Le concept de capteur intelligent est résumé en figure 2.1. Pour réaliser au minimum les fonctions notées ci-dessous, le capteur intelligent contient un organe de calcul interne. En premier lieu, un capteur intelligent est caractérisé par sa capacité de calcul et de traitement décentralisée, lui permettant d'élaborer des informations numériques et de communiquer avec un réseau.

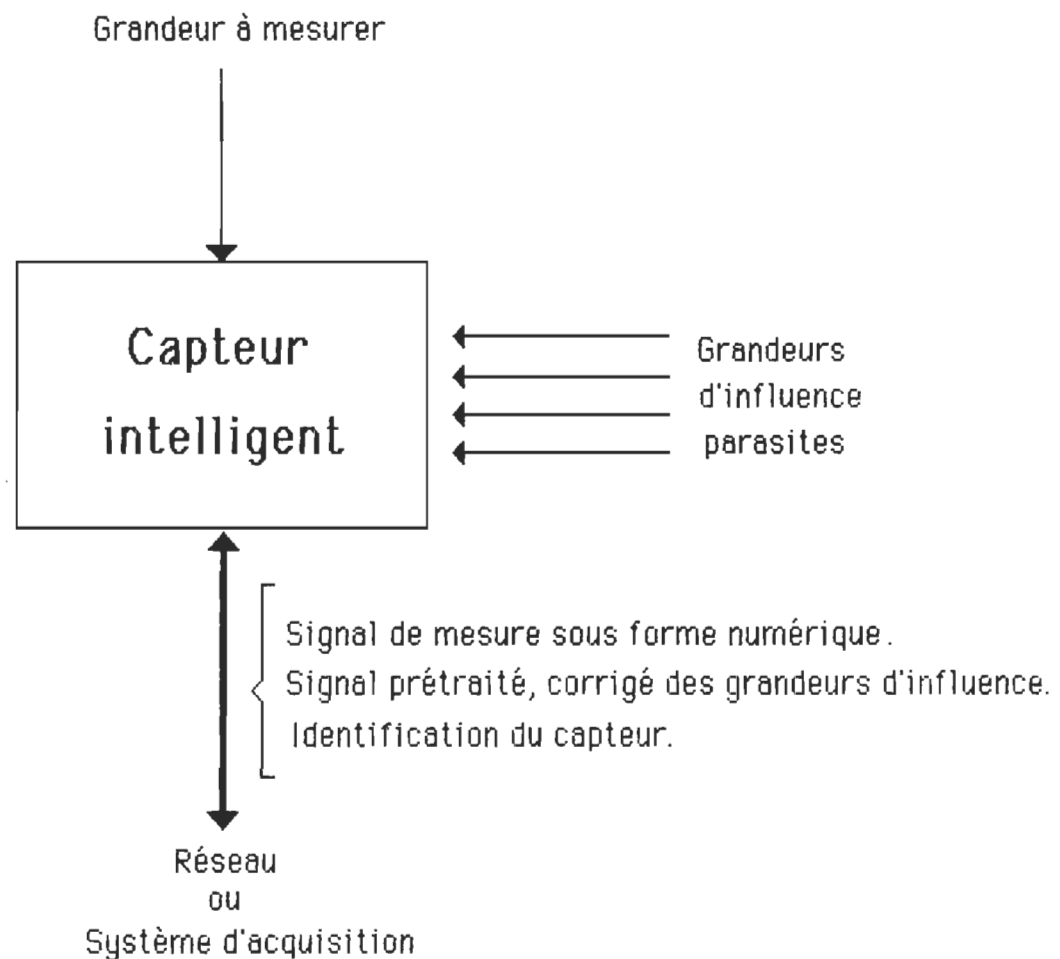


Figure 2.1. Principe du capteur intelligent.

Les caractéristiques fondamentales, qui font des capteurs intelligents une nouvelle génération d'instruments de mesure, sont principalement (voir figure 2.2) [6,7,9] :

- calcul direct de la grandeur physique mesurée (corrigée de ses grandeurs d'influence) et non plus exploitation d'une courbe d'étalonnage au niveau du calculateur central;
- signal sous forme numérique au lieu d'un signal analogique;
- identification du capteur;

- communication avec le réseau ou le calculateur central, et non plus simplement transmission;
- intégration de toutes ces performances supplémentaires dans la partie transmetteur, dégageant ainsi le calculateur central de des tâches routinières;
- possibilité d'autodiagnostic de bon fonctionnement et d'élaboration d'informations d'aide à la maintenance.

Le gain le plus apparent apporté par les capteurs intelligents commercialement disponibles à l'heure actuelle concerne la précision, améliorée par la correction systématique de l'influence des grandeurs parasites.

Cependant, le gain en précision n'est une fin en soi. Il doit être pondéré en fonction de l'application. Ainsi, si l'on prend l'exemple d'une mesure de débit précise 0.6% avec un organe déprimogène normalisé, mesurer la pression différentielle à 0.4% au lieu de 1% améliore le bilan de précision. Par contre, vouloir une mesure de ΔP à 0.1% est un faux problème, pour cette application précise. Mais l'intelligence, c'est aussi et peut être surtout une amélioration de la crédibilité technologique des mesures par une auto-surveillance du capteur.

Doit-on encore aller plus loin ? Doit-on, au niveau, du capteur, laisser à l'utilisateur des possibilités complémentaires permettant d'élaborer des informations plus sophistiquées en fonction de ses besoins ?

2.2.2. Constitution des capteurs intelligents

La constitution des futurs capteurs intelligents résultera de l'intégration notamment des critères suivants :

- cahier contenant les caractéristiques métrologique et fonctionnelle;
- contraintes technologiques (environnement, alimentation , transmission);
- architecture du système sur lequel seront raccordés les capteurs intelligents.

En tout état de cause, un capteur intelligent peut être décomposé en deux blocs (figure 2.2) [6,7] : un bloc capteur et un bloc transmetteur.

Le bloc capteur, réalise trois fonctions de base :

- les mesures de diverses grandeurs physiques (principale et parasites) au moyen de transducteurs appropriés;
- l'identification du capteur, stockée dans une PROM;
- mémoire des caractéristiques métrologiques des transducteurs dans cette même PROM, pour permettre les calculs de correction.

Le bloc transmetteur, devant effectuer au minimum trois fonctions de base :

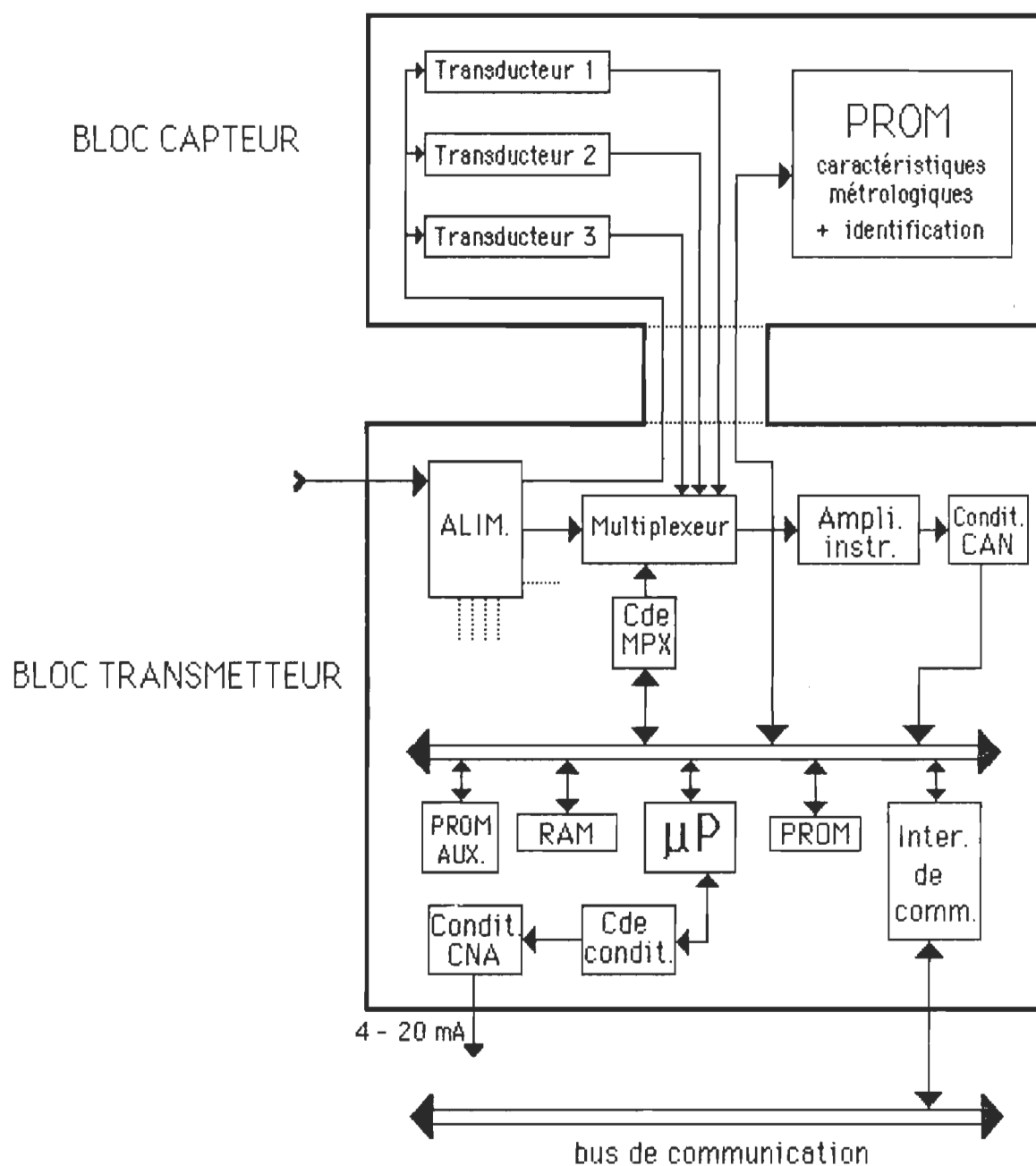


Figure 2.2. Constitution possible d'un capteur intelligent.

- alimentation de tous les composants;
- calcul, par microprocesseur avec les PROM associées de la grandeur physique mesurée corrigée des effets parasites;
- communication avec le réseau ou le système d'acquisition, permettant l'envoi d'informations (mesures, états, contrôles internes...) et la réception d'ordres ou de données, le tout sous forme numérique.

Cette constitution en deux blocs aux fonctions bien distinctes : le bloc capteur (mesures brutes/identification/"mémoire" métrologique) et le bloc transmetteur (alimentation / calculs / communication) montre bien que l'intelligence se trouve dans le transmetteur et non dans l'ensemble détecteur/capteur.

Le terme transmetteur pourrait être préféré à celui du capteur, trop restrictif dans son acceptation classique : en effet, l'intelligence ne réside pas dans l'élément capteur proprement dit (ensemble corps d'épreuve et détecteur, ou encore transducteur), mais dans l'ensemble électronique qui, à partir des signaux issus des capteurs, délivre un signal élaboré, sous une forme compatible avec le calculateur central ou le réseau.

A priori, du plus simple au plus compliqué, tous les types de capteur peuvent être améliorés par une intelligence locale. Depuis une simple linéarisation-conversion jusqu'à la prise en compte d'un grand nom-

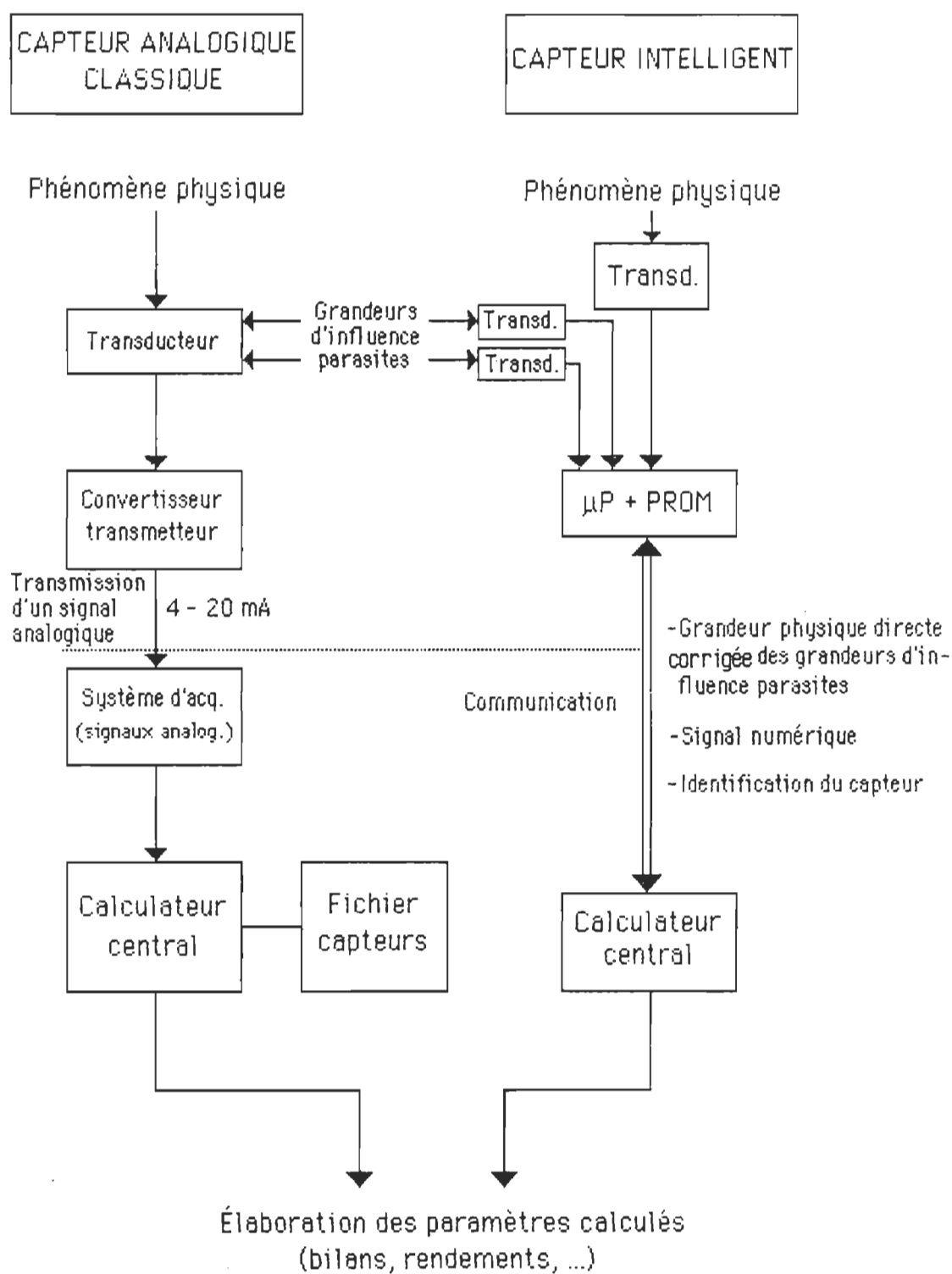


Figure 2.3. Capteur analogique classique et capteur intelligent numérique

bre de capteurs différents afin d'élaborer une information impossible à saisir directement, les champs d'application sont vaste. Dès à présent, des réalisations concrètes devraient pouvoir être envisagées (sonde platine, débitmètre, surveillance vibratoire de ligne d'arbre, capteurs de rayonnements ionisants...).

Cette séparation peut être de plus physiquement souhaitable pour plusieurs raisons :

- le bloc capteur est nécessairement très proche du milieu étudié, et donc peut se trouver dans un environnement particulièrement agressif (température, rayonnements ionisants, humidité, poussière...) pour des composants électroniques tels que ceux que contient le bloc transmetteur (microprocesseur notamment);
- de plus un même bloc transmetteur devrait être susceptible d'admettre en entrée multiplexée plusieurs blocs capteurs, de même type ou non, de façon à satisfaire diverses architectures possibles de réseaux [6,7,9].

Le bloc capteur comprend donc des transducteurs et une PROM. **Les transducteurs**, principal et auxiliaires (ainsi pour un capteur de pression différentielle) ce sont le transducteur de ΔP proprement dit, un transducteur de pression relative pour la mesure de la pression statique, et un capteur de température (sonde platine par exemple). La **PROM** contient en mémoire un programme d'identification de la cellule (N° de

série...) et ses caractéristiques métrologiques (pour un capteur de pression différentielle : non-linéarité, hystérésis, sensibilité à la température et la pression statique) . Cette PROM, en communication avec le microprocesseur du bloc transmetteur, lui fournira sur sa demande l'identification du bloc capteur et les paramètres de correction à appliquer.

Les qualités métrologiques globales du transmetteur intelligent dépendront des caractéristiques des transducteurs employés : ceux-ci devront donc posséder une fiabilité suffisante et une hystérésis la plus faible possible. La PROM devra satisfaire des critères de fiabilité exigeant dans des environnements sévères (température élevée, humidité, rayonnements ionisants, vibrations) : la réalisation technologique d'un tel composant est-elle envisageable et à quel coût, pour des applications industrielles ? Cette PROM devrait être en effet physiquement indissociable du bloc capteur pour éviter tout risque d'intervention entre transducteurs et PROM associée.

Le bloc transmetteur contient tous les composants capables de réaliser des calculs, élaborer des messages et communiquer avec le réseau ou le calculateur, par langage numérique.

Le bloc transmetteur est principalement composé de :

- l'ensemble alimentation et conditionneur, fournissant les différentes alimentations aux composants du capteur et du transmetteur;

- un bus de communication interne numérique sur lequel sont raccordés les différents composants obéissant au microprocesseur;
- un microprocesseur effectuant les calculs de corrections avec l'aide de PROM et RAM gérant tous ces auxiliaires en langage numérique et assurant la communication (émission/réception) grâce à une interface de communication avec le bus externe sur lequel est raccordé le transmetteur;
- un convertisseur numérique/analogique permettant de disposer, si besoin est, d'un signal type 4-20 mA, ou 0 V-5 V, ou 2V-10 V etc...

Le microprocesseur, pour l'élaboration du signal de mesure, commande, via le bus interne de communication, le multiplexeur pour acquérir les signaux issus des transducteurs, interroge la PROM du bloc capteur pour les corrections, exécute l'algorithme de correction, tient compte éventuellement d'autres corrections propres au phénomène physique, mises en mémoire dans une PROM auxiliaire. Pour la communication, l'interface avec le bus externe reçoit une nomenclature d'identification et de demande de message, transmet le message demandé (mesure, état, alarme...) et une nomenclature de fin de message.

2.2.3. Intérêt métrologique

Pour illustrer l'apport de l'intelligence dans la précision des me-

sure, l'exemple du transmetteur de pression est démonstratif [9]. Un transmetteur de pression différentielle, en dehors des caractéristiques métrologiques intrinsèques de sa cellule (non-linéarité, hystérésis, répétabilité) est sensible à la température (effets sur le zéro et sur la pente) et à la pression statique (effets sur le zéro et sur la pente). Ces effets parasites, s'ils ont une influence relativement faible pour des mesures effectuées au voisinage de l'étendue maximale de l'appareil, deviennent très importants. Lorsque l'on dilate l'échelle ; en effet, les dérives de zéro sont multipliées par le facteur d'échelle. Les incertitudes sont classiquement données en pourcentage de l'échelle étalonnée.

2.2.4. Intérêt fonctionnel

La décentralisation de l'intelligence au niveau des éléments transmetteurs, associés à un ou plusieurs capteurs, permet d'envisager des fonctions nouvelles génératrices d'une plus grande qualité d'information et d'une sûreté accrue de fonctionnement au niveau du système. Ces fonctions nouvelles peuvent être :

l'aide à la maintenance : des contrôles internes de bon fonctionnement de certains composants (alimentations, amplificateurs, boucle de courant 4-20 mA, transducteurs) peuvent être réalisés. Le microprocesseur élaborera des mots d'état et les transmettra au système central sous forme numérique : cet auto-diagnostic à distance permet d'accroître considérablement la crédibilité des informations délivrées, et d'augmenter la rapidité et l'efficacité de la maintenance du matériel. Ce diagnostic peut

être effectué sur demande du calculateur central. D'autre part, il paraît souhaitable que certaines alarmes et des commandes locales simples puissent être déclenchées à partir des messages de défaillances. Enfin, grâce aux mesures délivrées par les transducteurs, il est possible de savoir à distance si les grandeurs d'influence (température par exemple) s'approchent ou ont dépassé leurs valeurs extrêmes. De même, le transmetteur pourra mémoriser et transmettre tout dépassement de l'étendue de mesure (par exemple, avis de suppression accidentelle pour un transmetteur de pression).

configuration à distance : en plus de la possibilité d'identifier à distance le capteur (interrogation du microprocesseur et de la PROM du bloc capteur), il est possible de régler l'étendue de mesure pour la sortie analogique, soit par exemple demander une calibration électronique 0-200 mbar, pour un capteur 0-1000 mbar. Il est à remarquer que cette possibilité permet de réduire fortement le temps consacré à l'étalonnage : un étalonnage zéro/plein échelle suffit, sans points intermédiaires, les non-linéarités étant compensées de façon quasi-parfaite. La commutation de gamme à distance permet de diminuer de façon sensible le temps passé sur site aux réglages et mise en service des capteurs, tout en minimisant le nombre d'appareils à implanter (rangement accru). Un même transmetteur peut être susceptible d'accepter en entrée plusieurs capteurs, et de types différents (pression, température, rayonnement, déplacement, etc...), grâce à son multiplexeur et aux possibilités de calcul interne (linéarisation, résolution de fonctions). Un ou plusieurs transmetteurs

intelligents universels configurables pourraient être envisagés, au contraire de divers transmetteurs spécifiques comme c'est le cas pour les capteurs analogiques actuels. Bien évident les capteurs intelligents seront utilisables dans un réseau local, avec diverses architectures possibles (voir figure 2.4).

2.2.5. Aspect économique

Les caractéristiques métrologiques et fonctionnelles probables des futurs capteurs intelligents ont des incidences économiques appréciables, comme notamment [6] :

- une réduction des stocks de capteurs (grâce à la rangeabilité accrue);
- une minimisation du temps d'étalonnage (grâce à la correction des imperfections des transducteurs) et de calibration (configuration électronique à distance);
- une fiabilité accrue des mesures grâce aux possibilités d'auto-contrôle et d'alarme;
- la diminution des cout de câblage (grâce au bus de communication externe , le câblage fil à fil ne s'impose plus);
- l'allègement des tâches routinières du système de calcul central, grâce à la disparition notamment des fichiers d'étalonnage;
- à moyen terme, production de matériels standard, modulaire et compatibles avec les réseaux industriels.

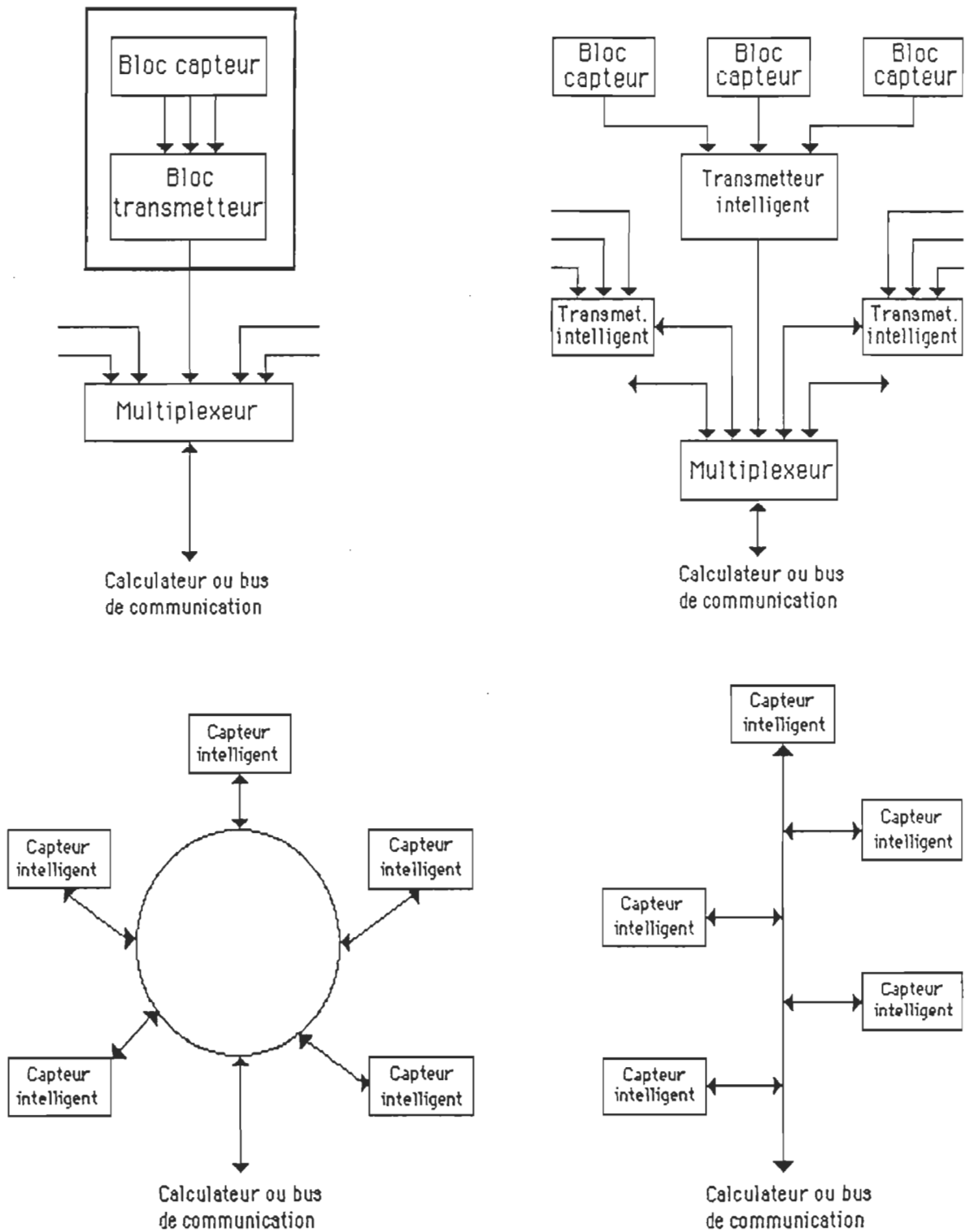


Figure 2.4. Architectures possibles.

Les marchés concernés sont l'instrumentation, la robotique et la productique. Pour illustrer les enjeux à venir, l'exemple du marché de transmetteur de pression industriel donne les chiffres suivants:

- marché mondial : plus de 300 000 pièces/an;
- marché français : 25 000 pièces commercialisées/an, pour un coût annuel de 22 milles dollars;
- répartition : 45 % différentiels - 55 % relatifs et absolus.

La première société américaine à avoir mis au point et commercialisé depuis 1983 le transmetteur de pression intelligent a produit en 1985 [6] [7]:

- 12 000 capteurs intelligents;
- 6 000 capteurs classiques.

Ces transmetteurs intelligents sont intégrable dans le système de contrôle-commande à communication numérique que distribue cette même société.

2.3. ASPECT TECHNOLOGIQUE DES CAPTEURS INTELLIGENTS

2.3.1. Technique de fabrication

En général, la production des circuits intégrés reliée aux techniques de film mince, avec le substrat de silicium ou de gallium arsenide donne un support mécanique pour les puces. Les films conducteurs et non-conducteurs sont déposés et découpés comme voulu. Les techniques de découpage, jusqu'à maintenant, sont largement basées sur des

techniques chimiques. De plus en plus cela implique une variété de techniques de décapement sec pour une suppression sélective anisotropique du matériel. Les matériaux isolants comme le nitrure de silicium et le dioxyde de silicium sont déposés par déposition de vapeur chimique pour la résistance et l'isolation des dispositifs. Ceci, tant que les conducteurs comme les métaux seront déposés en utilisant une variété de techniques à vide pour interconnection.

L'importance des films minces est observée dans la création récente de nouveaux capteurs à base de films minces au laboratoire de recherche de la NASA au centre de recherche Lewis à Cleveland, OH [5]. Le centre est concentré sur le développement de capteurs avancés, afin de pouvoir les utiliser dans les avions et la recherche dans les systèmes de propulsion dans l'espace. Les directeurs du laboratoire croient que les résultats sont visibles. La raison majeure est que les capteurs à film mince, petits et peut être introduit facilement à l'intérieur des équipements, peuvent être utilisés pour une large variété de travaux de mesurage dans l'engin, des grandeurs comme : la surtension, la température et le flux de chaleur. Grâce à la combinaison exceptionnelle des propriétés dans le silicium, la fabrication de différentes sortes de capteur dans le silicium lui même est rendu possible.

2.3.1. Classification des capteurs intelligents

La fabrication des capteurs intelligents peut être divisée à l'in-

térieur de trois catégories séparées [5] [8]:

- capteurs hybrides (capteurs plus silicium);
- capteurs sur le silicium;
- capteurs dans le silicium.

2.3.1.1. Capteurs hybrides (capteur plus silicium)

Les matériaux de films épais étalent une gamme de sensibilité aux phénomènes physiques et chimiques qui leurs permettent d'être utilisés pour usage à la détection. Le tableau 2.1 présente quelques un d'entre-eux. Si l'élément de détection est combiné d'une manière ou d'une autre dans le même boîtier que l'électronique, ou est voisin, nous avons un dispositif hybride qui correspond à la définition du capteur intelligent déjà mentionné auparavant. Par exemple, le capteur de température peut être fabriqué par l'impression de longues "pastilles de résistance de cermet" sur une pastille de diélectrique appropriée. Dans ce cas le coefficient de température de la résistance peut être à la fois linéarisé et changé de positif à négatif. La fabrication du capteur utilise la dispersion des coefficients de dilatation thermique et les propriétés piezorésistives des pastilles. Les matériaux de polymère de carbone à basse température constituent une gamme de pastilles de films épais. L'électrode de référence et électrode sélective d'ion , comme indiqué dans le tableau 2.1 [5] font partie de cette gamme de pastilles.

Grâce, aux effets piezorésistif que présentent ces mêmes pas-

Tableau 2.1. Fabrication de film épais

Entrée	Propriété de détection	Dispositif
Thermique	Coefficient de température	Résistance/conducteur Résistance/diélectrique
Chimique	Piézorésistance	Transducteur de pression
Mécanique	Équation de Nernst	Électrode sensible à l'ion Électrode de référence

tilles, la fabrication de capteurs de pression de petites tailles est réalisable. Ces derniers, sont sensibles aux pressions supérieures à 100 kPa, et donnent une sensibilité de 2 mV/kPas. L'électronique sur le substrat donne à la fois une sortie numérique et analogique. Le plus intéressant dans ces dispositifs hybrides, c'est qu'ils n'ont pas besoin d'être de grandes dimensions comme ceux fabriqués de silicium. Ils peuvent être aussi simples à construire et à fabriquer, particulièrement lorsqu'il s'agit de miniaturisation.

2.3.1.2. Les capteurs sur le silicium

Dans cette approche aussi, le fait que le silicium n'est pas un matériel optimum pour la détection d'un phénomène donné, peut être

surmonté, mais d'une façon différente. Ici, le matériel sensible peut être déposé sur la structure de silicium contenant l'électronique. Le silicium est combiné avec le saphir pour réduire les effets des capacités parasites. Le point important est que le silicium peut être combiné avec un autre matériel et garder sa monocristallinité [5] [9]. Possiblement, il peut être combiné avec le gallium et l'arsenic pour créer un capteur à meilleur effet de hall ou photodétecteur. Le silicium pourrait quand même exécuter la majorité des fonctions électroniques, si nécessaire, mais avec un matériel comme le gallium arsenide, les fonctions peuvent possiblement être partagées.

2.3.1.3. Les capteurs dans le silicium

Dans cette approche, les capteurs sont fabriqués dans le silicium lui même avec d'autres composants électroniques [5,9]. Il y a deux raisons pour cela. La première c'est que le silicium est sensible à plusieurs phénomènes chimiques et physiques. La deuxième est liée à l'ensemble de ses propriétés physiques (mécaniques) comme : sa très grande résistance aux contraintes mécaniques. En effet, avec son élasticité parfaite et sa répétabilité, les capteurs fabriqués de silicium peuvent donner des mesures qui sont précises de 0.1% ou mieux pendant des années.

Avec cette méthode, le capteur est traité de la même façon que n'importe quel composant sur la puce, permettant ainsi son intégration dans le circuit au début du processus du design [9]. Ceci est un point

important, pour lequel le silicium répondait à tous ces phénomènes, la réponse malheureusement n'est pas toujours optimale.

2.3.2. Applications industrielles et perspectives de développement des capteurs intelligents

Le marché industriel comprend le processus de contrôle et de la fabrication discrète de produits durs et mous dans n'importe quelle forme concevable et matérielle. Les progrès dans le développement de la technologie des capteurs, changent la façon dont le processus de contrôle est fait. Un exemple est observé dans le développement courant d'un analyseur chimique universel de la grandeur d'une boîte à chaussures [5]. A cause de sa taille et de sa base micro-électronique, son intégration à l'intérieur d'un de processus de ligne devrait être une procédure simple.

Dans la fabrication discrète , un des premiers domaines qui verra une vaste amélioration est celui de la robotique industrielle [5,9]. En ce qui concerne la vision et les capteurs tactiles, ils sont par inhérence des capteurs intelligents. En effet, la recherche sur la vision [5] est un facteur important dans le développement de ces derniers.

Dans tous les domaines de fabrication, un concept appelé "métrologie déterministe" [5] peut devenir la norme. Au lieu de mesurer le produit après sa fabrication, dans cette approche nous contribuons à la fabrication des outils et nous prenons leurs mesures. Si les outils ont été

correctement fabriqués dès le début, le produit final ne rencontrera aucun problème. Si nous détectons n'importe quelle déviation dans le processus ou dans l'environnement comme il arrive, et si nous compensons ces déviations, il n'y a aucune raison d'avoir une mauvaise fabrication de la pièce.

Il ne faut pas oublier le marché du consommateur [7] où les applications abondent, comme par exemple l'industrie de l'automobile. Parmi les raisons qui ont poussés à la recherche dans ce dernier domaine il y a : un grand nombre d'items identiques, coût relativement élevé pour chaque produit, importance du produit à la vie du consommateur (facteur de prestige), la combinaison de la sécurité, le confort, l'efficacité de l'énergie et les facteurs de pollution [9]. Ces applications comportent l'amélioration de l'efficacité du moteur, le confort des passagers et la sécurité (système de suspension intelligent, transmission antidérapante).

Le monde du consommateur renferme d'autres marchés, comme les articles ménagers et les jouets. Dans les articles ménagers, nous verrons des changements, comme le service d'urgence sur demande seulement. Actuellement, il y a des congélateurs qui sont conçus pour décongeler à des intervalles donnés. La détection de la gelée, comme dans plusieurs autres domaines, incluant la détection de l'humidité, bénéficieront du développement des capteurs intelligents qui peuvent effectivement prendre de telles mesures. Cela n'économise pas seulement l'argent mais l'énergie aussi, qui sera un point important dans l'avenir.

2.4. LES CAPTEURS DE GAZ

Cette section présente une description des différents types de capteurs de gaz ou de vapeurs actuellement sur le marché, et aborde les capteurs en voie de développement.

Le capteur est l'élément de base d'une chaîne de mesure, transformant une donnée physique en information électrique (numérique ou analogique) ou optique (se sont les deux moyens d'information les plus utilisés). La chaîne de mesure fournit l'information nécessaire pour contrôler un phénomène physique ou une réaction chimique d'une façon continue ou discontinue. Dans le cas d'un capteur de gaz il s'agit de la concentration d'une espèce chimique dans un volume gazeux.

Quelles sont les principales propriétés que l'on demande au capteur de gaz ? Il doit être dans la mesure du possible : sélectif, fidèle, rapide (temps de réponse inférieur à la minute), sensible dans une grande gamme de mesure (du ppm volumique à 100% volumique), peu sensible à l'influence de l'environnement, de faible coût, de petite dimension. Le capteur est inséparable de l'électronique (ou l'optique) de mesure qui peut permettre des modifications de propriétés : un ensemble de capteurs peu sélectifs mais à réponse bien modélisée pourra au moyen d'un microprocesseur devenir un capteur multiple sélectif; un capteur continu

peu fidèle parce que dérivant au cours du temps peut devenir fiable par une interrogation discontinue ou à l'aide d'un cycle de mesure (électrochimie).

Quelle classification adopter pour la présentation des capteurs de gaz ? Nous pouvons présenter les capteurs par gaz ou type de gaz détecté, ou selon le phénomène choisi pour permettre la mesure (variation d'un état physique, réaction chimique ...), ou encore selon la manière de mesurer la variation du phénomène choisi comme caractéristique. Considérons l'exemple suivant : Pour mesurer la concentration en oxygène nous pouvons utiliser des propriétés physiques de l'oxygène (paramagnétisme par exemple), ou chimique (action sur un réducteur); choisissant comme propriété une réaction d'oxydo-réduction, nous pouvons mesurer le courant d'oxydo-réduction, l'élévation de température du capteur due à la variation d'enthalpie lors de la réaction etc. Ces différentes méthodes de détection s'appliquent à d'autres gaz. Il semble donc plus judicieux de présenter les méthodes de mesure, en précisant ensuite à quels gaz ou classes de gaz elles s'appliquent.

2.4.1. Capteurs électrophysiques

Les premiers développements des capteurs de gaz ont été faits dans le domaine de l'explosimétrie : l'industrie charbonnière, en particulier, a contribué à l'essor des capteurs à combustion catalytique, qui sert à mesurer la concentration en gaz ou vapeur oxydable [34].

Le centre de recherche CERCHAR en France a mis au point le filament de grisoumètre [34] qui a permis un fonctionnement des mines avec une grande sécurité dans une ambiance de méthane allant jusqu'à 40% de la limite inférieure d'explosibilité; malgré une consommation d'énergie électrique de plus en plus grandissante, occasionnée par une mécanisation de plus en plus poussée de l'exploitation, les risques d'incendie et d'explosion sont bien maîtrisés. Ce capteur est tout simplement un fil de platine, actuellement de 80 μm de diamètre, qui catalyse la combustion du méthane et dont la variation de résistance est liée à la chaleur dégagée par la réaction, donc à la concentration en CH_4 (figure 2.5).

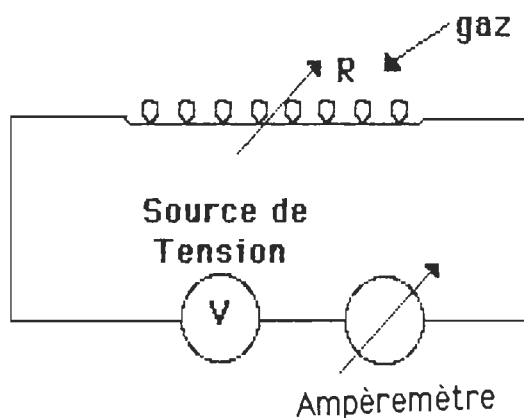


Figure 2.5. Filament-platine. La température du filament varie avec la combustion du gaz, la résistance du filament varie avec la température.

En fait, il n'est pas si simple d'obtenir un capteur fidèle et fiable; les améliorations apportées au cours des années ont permis d'obtenir actuellement plus d'un million de mesures sûres à l'aide du même

filament. A peu près dans le même temps se développaient en Grande-Bretagne des "pellistors", constitués d'un fil chauffant enrobé d'alumine dopé (figure 2.6) :

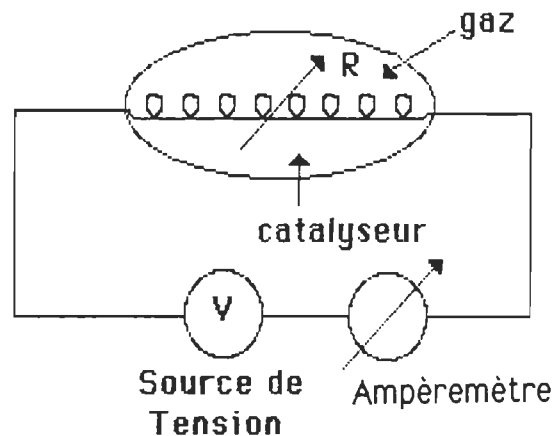


Figure 2.6. Pellistor. Le catalyseur et le filament de mesure sont dissociés. Le principe utilisé reste le même.

ce catalyseur permet une température de combustion beaucoup moins élevée, d'où l'utilisation en continu possible. Cependant la fidélité est moins bonne, mais suffisante pour un explosimètre à qui on ne demande pas l'exactitude du grisoumètre de mine.

Dix ans plus tard l'avènement des semi-conducteurs [34,35] amenait l'apparition sur le marché de détecteurs catalytiques à semi-conducteurs (figure 2.7). On mesure ici la variation de résistance d'un semi-conducteur : des variations relatives très faibles sont mesurables du fait de la valeur élevée de la résistance au départ, si bien que les concentrations volumiques limites mesurables sont beaucoup plus faibles

que dans le cas des deux types précédents : des % volumiques mesurables précédemment nous passons aux ppm volumiques. Cependant la stabilité de tels capteurs n'est pas excellente, et l'action de l'humidité les rend difficilement exploitables dans de nombreux cas. Leur sélectivité n'est pas meilleure que précédemment, mais on joue sur un dopage variable avec

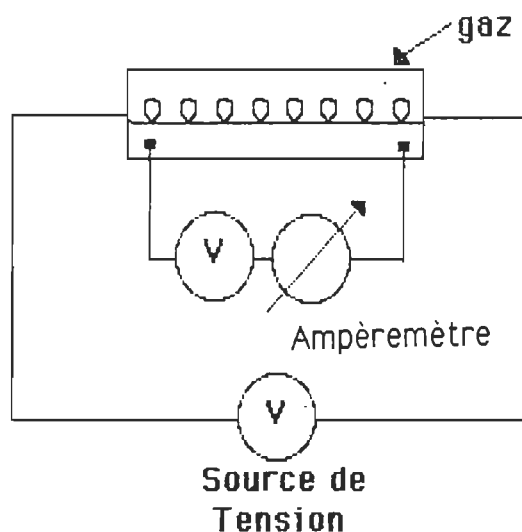


Figure 2.7. Semi-conducteur. Élément de mesure et catalyseur sont les mêmes. La résistance élevée du semi-conducteur nécessite un élément de chauffage annexe.

différents catalyseurs pour obtenir une certaine sélectivité. Depuis 7 à 8 ans ont été menées de nombreuses études dans diverses centres de recherches concernant les semi-conducteurs. En effet les mines par exemple ont besoin de détecter rapidement les débuts d'incendie, car un incendie devient vite catastrophique dans un milieu confiné. Jusqu'à

présent la détection se fait par la mesure de traces de monoxyde de carbone, à l'aide d'analyseurs spécialement étudiés pour les mines grisouteuses (matériel antidéflagrant). L'avènement des semi-conducteurs a fait espérer le remplacement de ces appareils lourds, chers, de maintenance délicate.

Une étude approfondie en laboratoire a été effectuée sur les différents capteurs de la compagnie Tagushi [1,35] : il s'agissait de voir si la présence de ppm volumiques de CO était détectable dans une ambiance à teneur élevée en CH₄ (2 % par exemple), dans laquelle des variations importantes d'humidité peuvent exister (50 à 100 % relatifs en un temps très restreint). Il était démontré qu'une combinaison de plusieurs détecteurs semi-conducteurs le permettait.

Les essais se sont alors poursuivis, les capteurs ont été essayés lors de feu de bandes de convoyeurs (cause de la moitié des incendies en mine), ou de feu de mousse (ces mousses servent à colmater les galeries pour éviter à l'oxygène de s'infiltrer dans les massifs de charbon et les échauffer lors du creusement des galeries). Les capteurs étaient installés toute la nuit précédant les essais pour voir l'influence des variations d'humidité et de température sur leur signal de base.

Le dépouillement des essais a montré qu'il était délicat, sauf dans le cas d'un incendie très rapide, de se fier à une alarme déclenchée par un semi-conducteur : une alarme positionnée trop près de la valeur de base se

déclenchera sur une variation d'humidité. Si par contre elle est positionnée pour éviter ces fausses alarmes, elle se déclenchera bien trop tard sur un feu couvant. Ces essais ont été conduits en l'absence de CH_4 ; les calculs montrent qu'en présence de CH_4 (1 %) les résultats s'améliorent. Les études n'ont pas débouché sur l'emploi de ces capteurs en mine car la consommation énergétique était très importante pour un emploi sur la centrale de surveillance généralisée de l'atmosphère que le centre de recherche CERCHAR était en train de développer [34]. Les allemands ont poussé les essais plus loin, mais préconisent également de combiner deux types de détecteurs pour augmenter la fiabilité d'une alarme [34].

Le manque de sélectivité des capteurs de gaz [34,35], constitue un sérieux obstacle en ce qui concerne l'utilisation des semi-conducteurs comme élément de détection. Pour mieux décrire les mécanismes physiques qui sont responsables de la caractéristique de non sélectivité des capteurs, un modèle théorique a été développé [34]. Chaque gaz qui supprime physiquement l'oxygène adsorbé par la surface de l'élément de détection contribue à la réponse détectée. L'équation de la réponse générale du capteur [34] qui représente la dépendance fonctionnelle des concentrations de chacun des gaz pris individuellement, peut mettre en évidence la cause de cette non sélectivité. Il est clair, qu'à partir d'une seule mesure, il est impossible de déduire le nombre, le type ou la concentration des gaz présents dans le milieu et qui contribuent à la réponse.

La forme de la dépendance de l'état de la résistance du capteur à base d'oxyde de métal homogène pour les gaz combustibles dans l'air est donnée par [34] :

$$R/R_0 = P_{O_2} * (1 + \sum (K_j * \pi * [G_i] * n_{ij}))^{-\beta} \quad (2.8)$$

Où P_{O_2} est un coefficient proportionnelle à la pression partielle de l'oxygène ($P_{O_2}=1$ pour l'air), $[G_i]$ est la concentration du gaz combustible i , n_{ij} est un nombre entier, R_0 est la résistance quand aucun gaz n'est présent et $\beta=KT/E_0$, où K est la constante de Boltzman, T est la température et E_0 est une constante qui caractérise la particularité du capteur.

Les formes appropriées limitantes de l'équation 2.8 sont utilisées pour le modèle de la réponse de la résistance des capteurs à base d'oxyde de métal . L'équation de la réponse est fournie pour les effets simultanés de combinaison de gaz. Les effets d'un seul gaz peuvent être masqués par la présence de plusieurs gaz qui affectent la résistance de l'élément de détection. L'influence d'un seul gaz ne peut être ressentie que si sa concentration dans la somme de l'équation 2.8 devient signifiante. Nous définissons le seuil de détection pour un gaz particulier : la concentration nécessaire qui changera la résistance du capteur par un facteur de deux. Cette concentration correspond au point d'inflexion de la courbe de la réponse. Pour les concentrations au dessous du seuil de détection, la résistance du capteur n'est pas sensible à la concentration du gaz présent, au dessus, elle suit une réponse d'une loi de puissance. La transition pour un

gaz particulier, se passe à la concentration qui dépend du niveau des autres gaz dans l'environnement ambiant. L'interaction compétitive par laquelle l'influence d'un gaz est masquée par la présence d'un autre gaz, est une interaction associative par laquelle les effets d'un seul gaz sont rehaussés par la présence d'un autre. La seule réaction qui fait partir la surface d'oxygène peut impliquer plusieurs gaz. Dans ce cas, la résistance de l'élément de détection dépendra du résultat des concentrations des deux gaz.

2.4.1.1. Accroissement de la sélectivité

Les efforts qui ont été faits pour rendre un capteur sensible à un seul gaz, en jouant sur la composition, le dopage ou la surface de préparation des éléments de détection ont apportés quelques réussites. L'idéal est de produire un capteur pour lequel les coefficients de sensibilités K_j de l'équation 2.8 de tous les gaz disparaîtront sauf un. La solution proposée est la suivante : si la sensibilité du capteur pour chaque gaz peut être modifié d'une façon différente, alors la forme mathématique de l'équation 2.8 représentant la réponse générale permettra l'accroissement de la sélectivité du capteur. Connaissant la dépendance fonctionnelle de la réponse du capteur pour les concentrations de chaque gaz, il est possible de déterminer les concentrations des gaz qui contribuent à la réponse en faisant un ensemble de mesures suffisantes. En faisant varier les paramètres p de contrôle, on modifie les coefficients de sensibilité K_j des gaz. Ces paramètres de contrôle p sont des paramètres physiques, chimiques ou électriques qui influencent le mode d'opération du

capteur, par exemple : la composition, la concentration du dopant, la température d'opération . La variation des paramètres, permettra de transformer l'équation 2.8 en un ensemble d'équations linéaires par rapport au K_j [34].

$$f(R, p_1) = 1 + \sum_{j=1}^m K_j(p_1) \prod_{i=1}^m [G_i]^{n_{ij}} + \Sigma(p_1) \quad (2.9)$$

$$f(R, p_2) = 1 + \sum_{j=1}^m K_j(p_2) \prod_{i=1}^m [G_i]^{n_{ij}} + \Sigma(p_2)$$

$$f(R, p_n) = 1 + \sum_{j=1}^m K_j(p_n) \prod_{i=1}^m [G_i]^{n_{ij}} + \Sigma(p_n)$$

Où $f(R, p_n)$ représente la fonction qui donne la valeur de la résistance du capteur. La dépendance de chaque sensibilité K_j du p_n doit-être déterminé expérimentalement.

2.4.1.2. Méthode de variation des paramètres

A. Filtrage du gaz

Avant l'exposition de la surface du semi-conducteur aux gaz qui constituent l'ambiance , on va filtrer le gaz qui nous intéresse. bien que la séparation est incomplète, un ensemble de filtres et de capteurs identiques peuvent-être utilisés pour produire un système d'équations similaire

au système d'équation 2.9. Si la séparation est complète comme le cas de la chromatographie, un seul capteur peut être utilisé pour la détection [34].

B. Préparation, composition et dopage du capteur

En faisant varier ces trois composantes, on est capable de faire varier la sensibilité du capteur pour chaque gaz qu'il peut détecter. Pour cela on a besoin d'un système qui change à chaque fois la constitution de l'élément de détection du capteur [34].

C. Variation de la température

En général, le modèle de détection prédit une dépendance exponentielle des coefficients de sensibilité des gaz par rapport à l'inverse de la température caractérisée par une activation d'énergie. Si les énergies d'activation pour les réactions de divers gaz sont suffisamment différentes, les coefficients de sensibilité peuvent être modifiés par la variation de la température. Un système avec des réponses indépendantes peut être déterminé par la mise en opération de plusieurs capteurs à des températures différentes, ou par une opération séquentielle avec un seul capteur opérant à plusieurs températures. Dans ce dernier cas, la grande constante de temps associée à la réponse transitoire durant le changement de la température complique les mesures [34].

D. La multidétection

L'intégration de la multidétection [7], est une opération interdisciplinaire qui implique plusieurs domaines différents. Ceci inclut spécialement les techniques de fabrication des capteurs pour le traitement et la surveillance de l'équipement, traitement et modélisation de l'équipement, nouvelles méthodes de mesure et d'inspection et possiblement le système expert pour les opérations de contrôles. Actuellement, cette méthode est très utilisée pour identifier un ensemble de gaz constituant un échantillon [4,7]. Le principe de la technique de la multidétection est résumé dans la figure 2.8 ci-dessous.

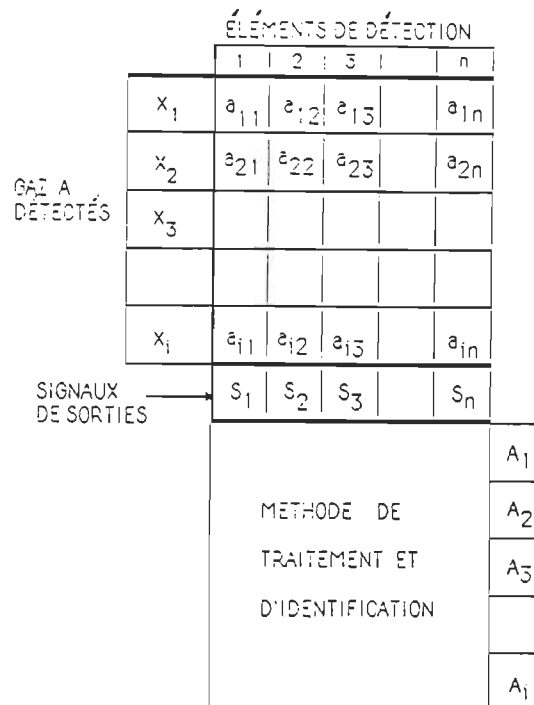


Figure 2.8. Principe de la multidétection.

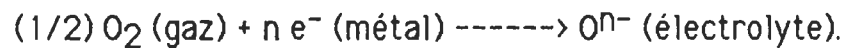
Pour déterminer les concentrations des gaz X_1, X_2, \dots, X_i constituant l'échantillon, cette méthode nécessite l'utilisation de n éléments de détection. Les coefficients a de ces derniers représentent la sensibilité de chacun d'eux pour un gaz donné. Par exemple, le coefficient a_{23} représente la sensibilité de l'élément de détection 3 au gaz X_2 . En développant une méthode de traitement des signaux S_1, S_2, \dots, S_n issus des n éléments de détection, nous sommes capable de fournir les concentrations A_1, A_2, \dots, A_n correspondant aux gaz X_1, X_2, \dots, X_i présent dans l'échantillon. Donc, la crédibilité des résultats dépendra en premier lieu de la méthode de traitement utilisée pour l'identification.

2.4.2. Capteurs électrochimiques

Une toute autre approche est faite ici par des électrochimistes [34]. On ne joue plus principalement sur les réactions d'absorption et de combustion mais sur la mobilité des ions en solution solide (cas du détecteur d'oxygène) ou en solution liquide (cas des détecteurs de vapeurs toxiques, CO , H_2S , NO_x , etc). Pour comprendre le principe de fonctionnement de ces capteurs, nous allons décrire le détecteur d'oxygène de type potentiométrique et le capteur de type ampérométrique, pour l'oxygène ou les gaz toxiques réducteurs.

Le capteur d'oxygène [34] à zircone est le plus utilisé en contrôle de combustion. Le principe est le suivant (figure 2.9) : un élec-

trolyte solide est au contact de part et d'autre de ses deux parois avec un gaz à deux pressions partielles différentes, et ceci par l'intermédiaire de deux conducteurs électroniques. A chaque électrode a lieu une réaction de la forme :



Il apparait une différence de potentiel qui suit la loi de Nernst :

$$E = (RT/2nF) \text{ Log } (P/\text{Préf})$$

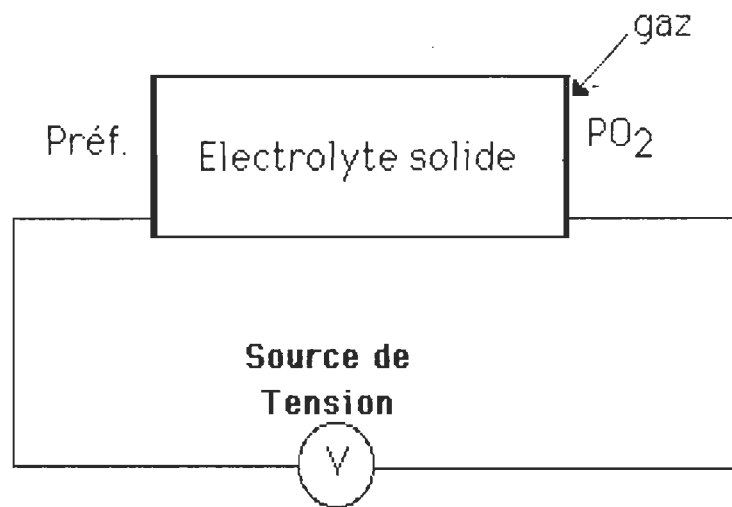
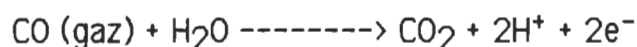


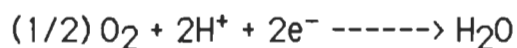
Figure 2.9. Sonde à électrolyte solide. Mesure d'une différence de potentiel.

Connaissant la température et la pression de référence (Préf.) on en déduit la pression P, donc la concentration. L'inconvénient de ces capteurs est

leur fonctionnement à haute température. L'autre type de capteur très utilisé est le capteur ampérométrique [34] dont le principe du cas d'un détecteur de gaz réducteur, se schématise comme présenté dans la figure 2.10. Le gaz traverse une membrane semi-perméable et réagit au contact de l'élec-trolyte liquide sur l'électrode de platine selon la réaction (exemple du CO) :



sur l'autre électrode l'oxygène se réduit :



Le courant mesuré est limité par la diffusion de CO à travers la membrane, il est donc proportionnel à la pression partielle du gaz à l'extérieur du capteur, ou directement à la concentration volumique suivant l'épaisseur de la membrane. Dans le cas du capteur d'oxygène, il y a oxydation du plomb qui sert d'électrode.

Ces capteurs sont assez développés maintenant, en particulier dans tous les détecteurs de CO ou H₂S [2]. Les problèmes de fiabilité qu'ils ont rencontrés au départ sont assez bien résolus maintenant (problèmes d'étanchéité du fait des électrolytes concentrés) [34]. Certains sont très bien compensés en température. Il souffrent cependant d'un manque de sélectivité, auquel on peut palier par des filtres appropriés, mais qui aug-

mente le temps de réponse [34]. Ils doivent également être étalonnés assez fréquemment car la modification des propriétés catalytiques des électrodes entraîne une dérive en sensibilité. Dans le cas du capteur d'oxygène aux teneurs atmosphériques ce phénomène n'est pas très important. Il l'est plus pour les cellules qui mesurent des ppm volumiques [2].

Il y a des études importantes qui ont été réalisées sur les cellules électrochimiques de détection d'oxyde de carbone; leurs limites sont

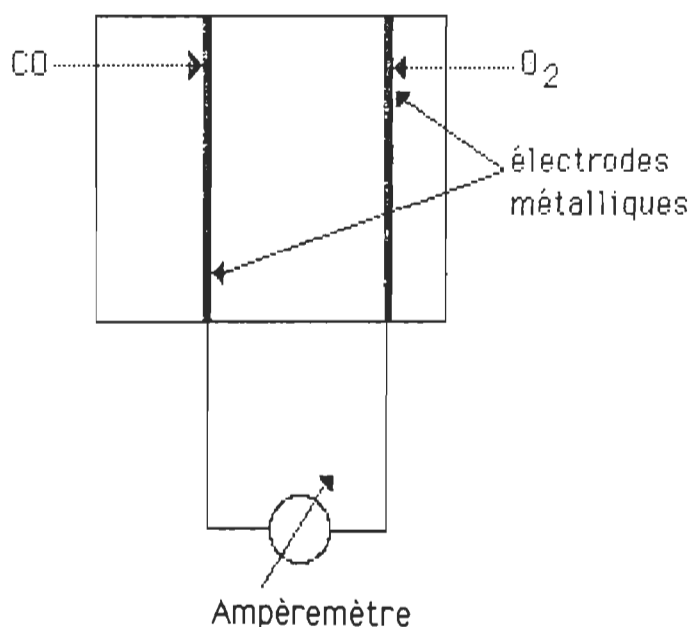


Figure 2.10. Cellule électrochimique. Mesure d'un courant d'oxydo-réduction.

actuellement bien connues; il est envisagé de les utiliser, mais avec précaution au début, comme détecteur d'incendie en mine. Un avantage par

rapport aux semi-conducteurs est leur faible consommation électrique : fonctionnant à la température ambiante avec des temps de réponse corrects (30 secondes environ) ces capteurs ne demandent qu'une amplification de signal. De plus le méthane et l'humidité n'ont aucune action.

2.4.3. Tendances de développement des capteurs de gaz

Les recherches continuent à se développer dans les domaines que nous avons cités précédemment :

- amélioration des pellistors par une porosité du catalyseur mieux maîtrisée, utilisation des zéolithes poreuses;
- polymères électroactifs [1,34], matériaux déposés en couches de Langmuir [1];
- capteurs électrochimiques pour la détection d'autres gaz, capteurs à électrolyte non aqueux [1,34];
- nouveaux matériaux semi-conducteurs;
- catalyse par les bimétaux ...

Outre l'étude de nouveaux matériaux, les recherches se font en utilisant les nouvelles techniques issues du développement de l'électronique et de télécommunication [7] :

- micro-électronique [1,34] (couches épaisses ou couches minces, MOSFET) pour réduire le coût et l'encombrement des capteurs;
- micro-informatique, pour rendre le capteur intelligent, c'est-à-dire qu'un traitement électronique au niveau du capteur permet une amélioration de ses performances;
- fibres optiques [34] (suppression des dangers d'explosion dûs à l'électricité , grande immunité à l'environnement électromagnétique).

CHAPITRE 3

ÉTUDE DU CAPTEUR DE STYRENE

Pour ce travail de recherche sur la détection des vapeurs de styrène, le capteur AG3100 de la compagnie " International Sensor Technology " (voir annexe A.3) est utilisé pour la détection de ces vapeurs toxiques. Le principe de fonctionnement de ce capteur est basé sur la variation de sa résistance en fonction de la concentration des vapeurs de styrène. Dans ce chapitre, il sera question d'étudier différentes unités constituant ce capteur et les éléments nécessaires permettant de voir et d'étudier son fonctionnement dans un milieu industriel simulé. Ceci permettra d'évaluer les performances et les faiblesses que peut présenter ce capteur une fois utilisé dans un milieu industriel réel.

3.1. CAPTEUR DE STYRENE

3.1.1. Unité alimentation et régulation

L'alimentation représentée par la figure 3.1 est constituée par un pont redresseur double alternance à prise médiane. La tension redressée produit un courant qui charge le condensateur C1 à travers la résistance R1. Cette tension redressée non régulée de 12 V (D.C) qui alimente tous les composants du capteur sauf les relais fonctionnant à 12 V (D.C). Remarquons aussi la présence d'une alimentation de secours 12 V (D.C) qui char-

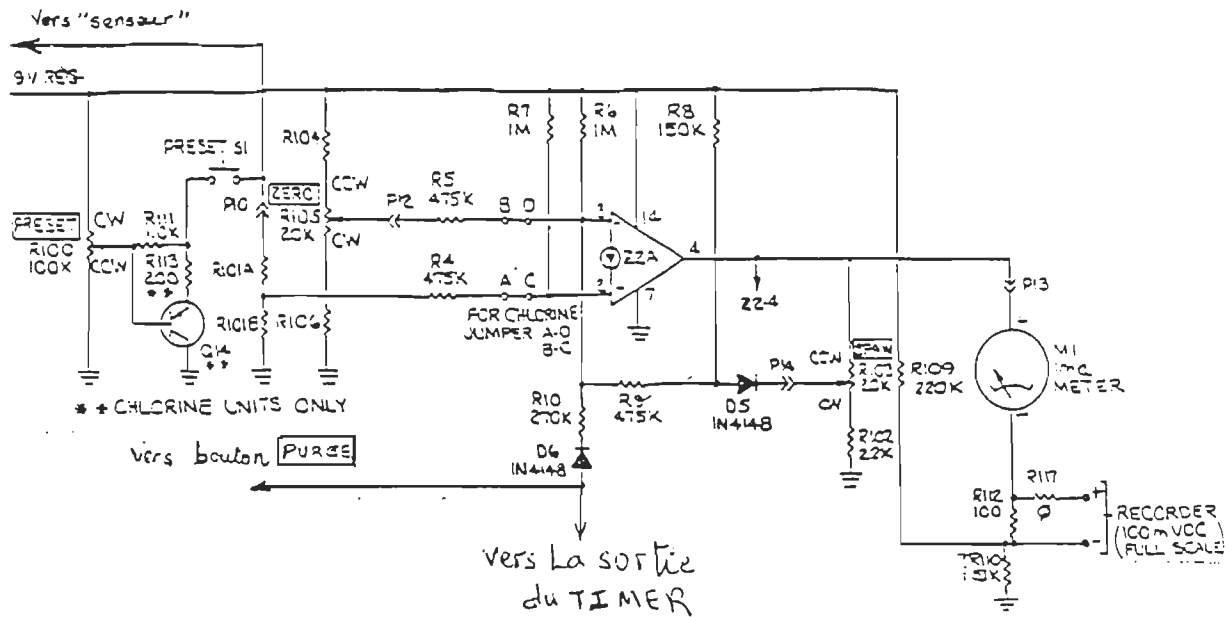


Figure 3.2. Circuit de contrôle du "METER"

teur commun pour avoir un courant fort permettant de simuler la sortie du capteur. Le seuil désiré pour l'unité ALARM et WARM peut-être fixé à l'aide du potentiomètre PRESET. La liaison vers le bouton PURGE permet de réaliser une remise à zéro rapide de l'appareil. Remarquons que cette liaison arrive à l'entrée inversée de l'amplificateur de norton, c'est-à-dire au même point que le potentiomètre de réglage du zéro. La liaison avec le TIMER permet de retarder le fonctionnement du METER et de l'alarme pendant 30 secondes. Durant ce temps, l'appareil reste sous tension et ce ne sont que les circuits de mise en condition du capteur qui fonctionnent pour ainsi le préparer à opérer. Le potentiomètre SPAN est utilisé pendant la calibration de l'appareil pour ajuster l'échelle du METER avec la concentration du gaz utilisé pour l'opération. L'amplificateur de Norton

Z2A opère comme un amplificateur de courant idéal pour garantir au METER une bonne stabilité pendant les mesures.

3.2.3. Unité de contrôle du "SENSOR"

Comme le montre la figure 3.3, les transistors Q3 et Q4 couplés ensemble, permettent de fournir le courant nécessaire pour varier la polarisation de la base du transistor Q5 à travers la résistance variable R41. Les transistors Q5 et Q6, montés en Darlington permettent de réaliser un amplificateur de courant à gain très élevé. Ceci va permettre l'échauffement du capteur afin de le maintenir à une température constante.

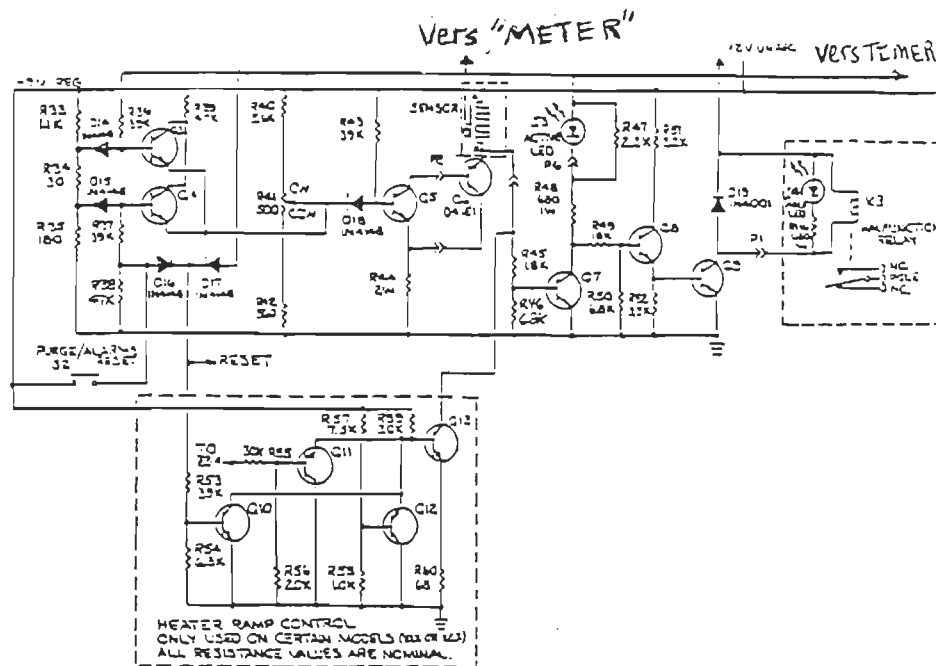


Figure 3.3. Circuit de contrôle du "SENSOR"

Le circuit de contrôle au cours du fonctionnement normal est constitué par les transistors Q11 et Q13 reliés à la sortie de l'amplificateur de norton Z2A qui commande le METER. Pendant le fonctionnement du bouton PURGE/ALARM/RESET, la diode D16 laisse passer du courant pour polariser la base du transistor Q10 qui devient conducteur. Ceci permettra la saturation du transistor Q12 et le blocage du transistor Q13. Tout cela a pour effet de couper le courant qui alimente le capteur à travers les transistors Q5 et Q6 (darlington) permettant ainsi une remise à zéro rapide. Tant que le transistor Q7 est polarisé la diode électroluminescente I3 (ACTIVE) est allumée, et les transistors Q8 et Q9 restent bloqués. Ceci implique que le capteur fonctionne normalement. Mais lorsqu'il intervient un défaut durant le fonctionnement du capteur, la paire de transistors Q5 et Q6 devient déconnectée par rapport au capteur. Donc, le transistor Q7 se bloque et les transistors Q8 et Q9 deviennent passant, provoquant ainsi l'allumage de la diode électroluminescente I4 (MALF). Cette dernière, nous indique que le capteur ne fonctionne plus normalement. La borne RESET permet de réinitialiser le seuil pour les unités ALARM et WARM. La diode D19 réalise la roue libre pour le relais K3.

3.2.4. Unité "WARM"

Le premier amplificateur Z2D (voir figure 3.4) est monté en comparateur et permet de déclencher l'unité WARM. Les opérations à réaliser sont les suivantes :

de contrôle du METER est en bas du seuil fixé, la sortie du comparateur est à l'état logique "1" ce qui bloque l'oscillateur. Dans le cas contraire, la sortie du comparateur est à l'état logique "0" ce qui permet à l'oscillateur de fonctionner. Le transistor Q15 polarise Q2 monté en collecteur commun afin de conduire assez de courant pour alimenter le relais K1, la diode électro-luminescente I11 et l'alarme sonore. La diode D13 réalise la roue libre pour le relais K1.

3.2.5. Unité "ALARM"

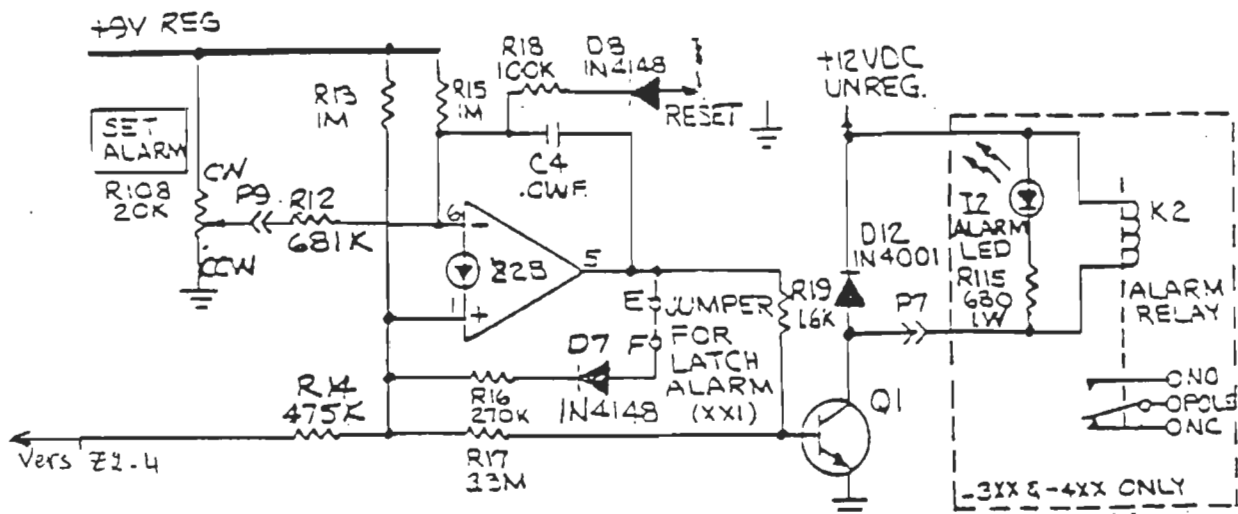


Figure 3.5. Circuit de l'unité "ALARM"

Pour cette unité, l'amplificateur Z2B est monté en comparateur non-inversé. La méthode de réglage du seuil est la même que celle définie

pour l'unité WARM. Le seuil étant fixé sur l'entrée inverseuse, implique que lorsque l'entrée non-inversée est inférieure au seuil la sortie du comparateur est tirée vers la masse. Dans le cas contraire, elle prend l'état logique "1" et polarise le transistor Q1. La diode électroluminescente I2 s'allume et le relais K2 est alimenté. La diode D12 réalise la roue libre pour le relais K2.

3.2.6. Unité "TIMER"

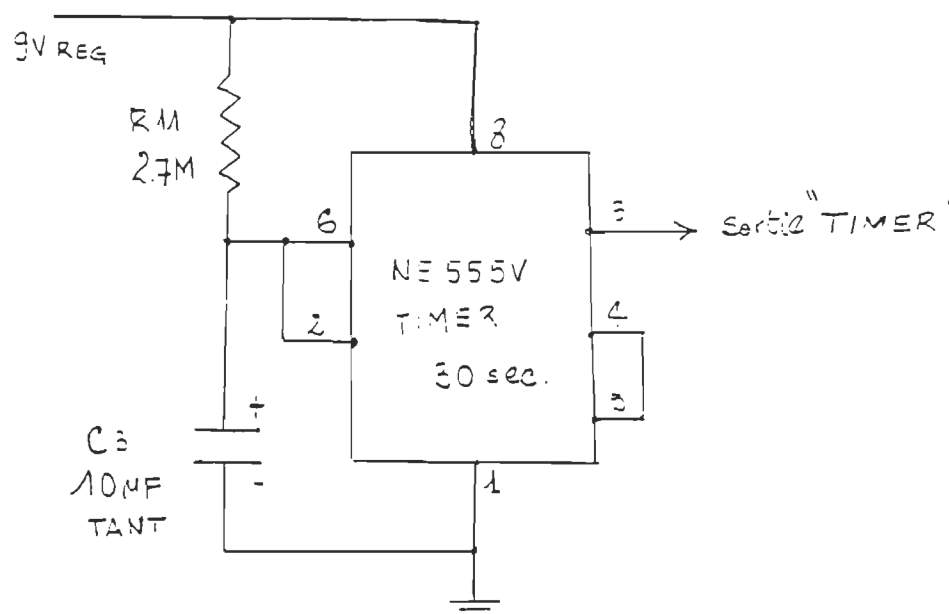


Figure 3.6. Circuit de l'unité "TIMER"

Le TIMER permet de réaliser un délai de 30 secondes environ avant que les commandes ALARM et WARM ne soient opérationnelles. Pendant ce délai, seulement les circuits qui contrôlent le capteur sont en état de fonctionnement.

3.2.7. Possibilité ou nécessité

Parmi les possibilités que nous offre ce capteur des vapeurs de styrène il y a :

- une sortie analogique qui varie entre 0 et 100 mV en balayant une gamme de concentration allant de 0 à 300 p.p.m;
- une bonne sensibilité aux petites variations;
- une caractéristique de sortie qui est quasi-linéaire dans une région de 50 à 300 p.p.m;
- la facilité de l'intégrer dans la chaîne de mesure. Cela permettra de bien connaître son fonctionnement dans un milieu industriel;
- la facilité de son adaptation à l'ajout d'une intelligence locale.

3.2. ÉLÉMENTS NÉCESSAIRE POUR L'ÉTUDE DU CAPTEUR DE STYRENE

Pour bien connaître et estimer le fonctionnement de ce capteur dans un milieu industriel, il faut :

- mettre au point un système qui permettra d'étudier son fonctionnement et qui simulera le milieu industriel;
- pouvoir contrôler et avoir les informations nécessaires sur certaines grandeurs comme la température et la pression.

Pour cela, on a besoin d'ajouter d'autres capteurs au capteur de styrène;

- ajouter un élément essentiel dans cette étude qui permettra de traiter numériquement avec une certaine facilité les information issues des capteurs.

3.2.1. Le montage expérimental

Le montage expérimental qu'on a conçu pour simuler le milieu industriel est représenté par la figure 3.7. Avec ce montage, on est capable d'étudier le comportement du détecteur des vapeurs de styrène en faisant varier les paramètres susceptibles d'affecter la caractéristique de sortie de ce capteur. Il est formé principalement d'une chambre qu'on désigne par la lettre C sur la figure 3.7. Dans cette dernière qui doit être parfaitement étanche, on va placer le détecteur des vapeurs de styrène, un capteur de température et un capteur de pression. Tout ces capteurs sont reliés avec le reste du système de mesure par des fils blindés désignés par la lettre L sur la figure 3.7. Les deux modes d'opération utilisés pour injecter différentes concentrations des vapeurs de styrène dans la chambre C sont les suivants :

- le jeu des manomètres, en se servant de la chambre C, des manomètres d'eau E1 et E2, des manomètres de mercure M1 et M2 et des ballons B1 et B2 (voir figure 3.7);
- l'injection par seringue, en se servant seulement d'une seringue et de la chambre C (voir figure 3.7).

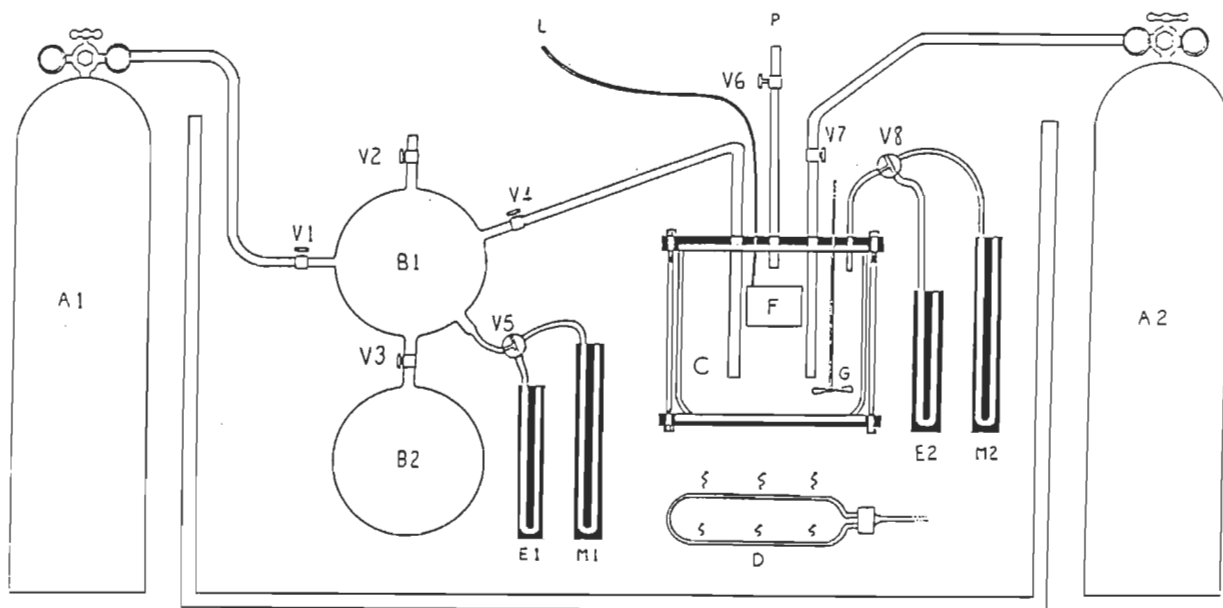


Figure 3.7. Schéma du montage simulant le milieu industriel.

Voir la légende dans la page suivante.

3.2.1.1. Le jeu des manomètres

Le styrène sous forme liquide, va être placé dans le ballon B2 (voir figure 3.7). Les manomètres d'eau et de mercure connectés au ballon B1 et à la chambre C vont nous indiquer la pression dans ces deux enceintes. Ceci permettra de connaître la fraction molaire du styrène présente à chaque instant. Tout les éléments constituant le montage de la figure 3.7 sont placés dans un bain thermostaté. Ainsi ils se retrouvent aux mêmes conditions climatiques.

LÉGENDE DE LA FIGURE 3.7.

Y1, Y3, Y7, Y4 = valves d'entrée

Y5, Y8 = valves de commutation

Y2, Y6 = valves de purge

M1, M2 = manomètres de mercure

E1, E2 = manomètres d'eau

A1, A2 = bombones d'air ou d'azote

B1, B2 = ballons pour l'injection par le jeu des manomètres

C = chambre étanche

F = capteur de pression, de température et de styrène

G = agitateur

D = élément chauffant

L = liaison entre les capteurs et le système de mesure

La méthode pour injecter différentes concentrations des vapeurs de styrène dans la chambre C est possible en réalisant les étapes suivante:

A. Première étape

La première étape consiste à faire une purge total du système. Pour cela, on ouvre les valves V2, V4 et V6. On doit s'assurer aussi que les valves V5 et V8 sont connectées sur les manomètres de mercure. Pour faire circuler de l'air ou de l'azote dans tout le système, on utilise les deux bombonnes H1 et H2 et on ouvre les valves V1 et V7. Le but principale de cette étape est d'éliminer les vapeurs de styrène qui se trouvent dans le ballon B1, dans la chambre C et dans la tuyauterie. Cette manipulation est une étape d'initialisation du système.

B. Deuxième étape

La deuxième étape consiste à placer les vapeurs de styrène dans le ballon B1. Avant la réalisation de cette étape, il faut fermer toutes les valves ouvertes, couper la circulation de l'air ou de l'azote dans le système en fermant les bombonnes H1 et H2, et maintenir une pression constante dans le ballon B1 et la chambre C. On fixe la température du bain thermostaté ce qui provoquera une évaporation du styrène sous forme liquide dans le ballon B2. Après on ouvre la vanne V3 et les vapeurs de styrène pren-

dront place dans le ballon B1. Normalement il y aurait une faible augmentation de la pression qui n'est pas détectable par le manomètre de mercure connecté au ballon B1. Pour permettre la lecture de cette petite variation de pression on commute avec la vanne V5 sur le manomètre d'eau. Cette lecture permettra de calculer la pression qui doit être dans la chambre C et qui correspondra à la concentration qu'on veut injecter.

C. Troisième étape

La troisième étape est celle qui nous permettra d'injecter différentes concentrations dans la chambre C en jouant avec la valve V4. Par exemple, si on veut envoyer 50 p.p.m de vapeur de styrène on procède de la manière suivante :

- on calcule théoriquement la valeur de la pression qui correspondra à 50 p.p.m et qui devrait être dans la chambre C,
- on ouvre la valve V4 jusqu'à ce que la pression dans la chambre C soit égale à celle déjà calculée théoriquement. Par la suite on ferme la valve V4.

3.2.1.2. L'injection par seringue

En ce qui concerne l'injection par seringue, on a adapté le montage expérimental utilisé pour le jeu des manomètres (voir figure 3.7). Parmi les modifications effectuées, l'élimination de la liaison qui existe entre le ballon B1 et la chambre C. A la place de cette liaison, on a placé

un septum qui servira pour utiliser la seringue et une membrane septa qui permettra de garder l'étanchéité de la chambre C après injection. La méthode utilisée pour injecter différentes concentrations en utilisant la seringue de 1 μ l ou de 10 μ l se fait en réalisant les étapes suivantes :

A. Première étape

Comme pour le cas du jeu des manomètres, cette étape consiste à faire une purge total du système. Pour cela, on ouvre la valve V6 et on doit s'assurer que la valve V8 est branchée sur le manomètre de mercure M2. Pour faire circuler de l'air ou de l'azote dans la chambre C, on utilise la bombonne H2 et on ouvre la valve V7 (voir figure 3.7). Le but principal de cette étape, est d'éliminer les vapeurs de styrène qui se trouve dans la chambre C et dans la tuyauteries.

B. Deuxième étape

Il faut fermer toutes les valves ouvertes, couper la circulation de l'air ou de l'azote en fermant la bombonne H2 et maintenir une pression constante dans la chambre C. Avant de commencer à opérer, il faut attendre que la température du bain thermostaté se stabilise à la valeur voulue. Pour injecter une concentration donnée, on calcule le volume du styrène liquide qui correspondra à cette concentration et on l'injecte avec la seringue dans la chambre C à travers le septum nut.

3.2.2. Le capteur de température

Afin de tenir compte de la variable environnementale température sur la mesure des vapeurs d'hydrocarbures, on a équipé le détecteur des vapeurs de styrène d'un capteur de température. L'association des deux capteurs permettra d'étudier le comportement du capteur de styrène dans le milieu industriel simulé par le montage expérimentale qu'on vient d'expliquer précédemment (voir figure 3.7).

3.2.2.1. Principe de mesure

Les capteurs à résistance de la température nommé RTD (ang. : Resistance Temperature Detectors) [36] sont fabriqués de métaux dont les propriétés physiques sont telles que : le facteur de résistance du métal augmente proportionnellement avec l'augmentation de la température. Le capteur de température qu'on a utilisé est de la série MICRO SWITCH TD (TD1A) [36].

3.2.2.2. Caractéristique du capteur

Le circuit de la résistance de ce type de capteur est composé d'un film mince de résistance ajustable au rayon laser. Il est interchangeable,

Tableau 3.1. Relation résistance-température R(T)

TEMPÉRATURE [°C]	RÉSISTANCE [Ω]
-40	1584 ± 10 (±1.5 °C)
-30	1649 ± 09 (±1.3 °C)
-20	1716 ± 08 (±1.2 °C)
-10	1784 ± 07 (±1.0 °C)
0	1855 ± 06 (±0.8 °C)
+10	1926 ± 06 (±0.8 °C)
+20	2000 ± 05 (±0.7 °C)
+30	2075 ± 06 (±0.8 °C)
+40	2153 ± 07 (±0.9 °C)
+50	2231 ± 07 (±0.9 °C)
+60	2312 ± 09 (±1.1 °C)
+70	2394 ± 10 (±1.2 °C)
+80	2478 ± 12 (±1.4 °C)
+90	2564 ± 14 (±1.6 °C)
+100	2651 ± 16 (±1.8 °C)
+110	2740 ± 18 (±2.0 °C)
+120	2831 ± 20 (±2.2 °C)
+130	2924 ± 22 (±2.3 °C)
+140	3018 ± 24 (±2.5 °C)
+150	3114 ± 25 (±2.5 °C)

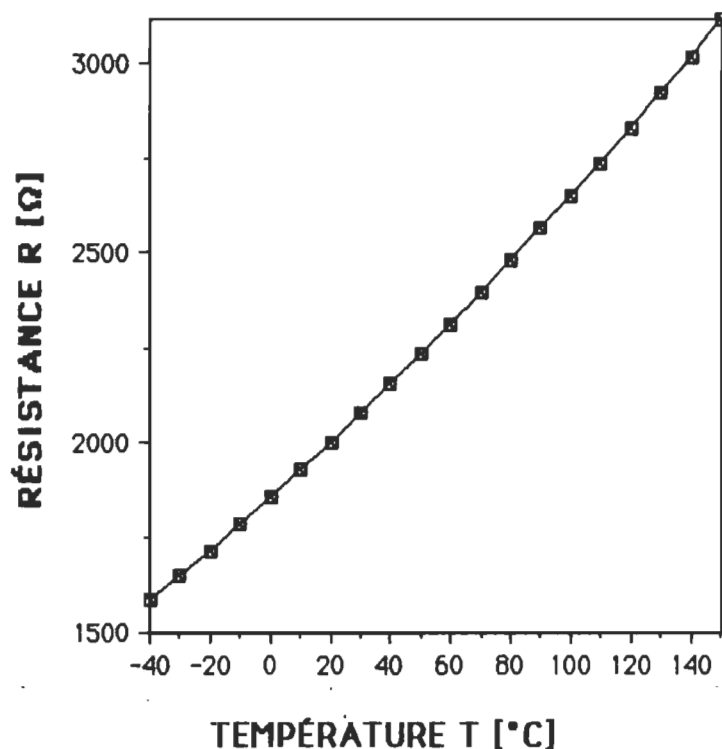


Figure 3.8. Relation résistance-température $R(T)$.

sans étalonnage, avec une exactitude de 0.7°C à 20°C . Sa sensibilité est de $8\Omega/^{\circ}\text{C}$ et a une caractéristique de sortie presque linéaire (voir tableau 3.1 et figure 3.8) [36].

La relation résistance-température qui permettra l'évaluation de la résistance en fonction de la température peut être approximée par l'équation suivante [36] :

$$R(T) = R(0) [1 + 3.83 \cdot 10^{-3} \cdot T + 4.64 \cdot 10^{-6} \cdot T^2] \quad (3.1)$$

où $R(T)$ est en Ω et T en $^{\circ}\text{C}$.

3.2.3. Le capteur de pression

Pour la vérification et le calcul des concentrations que l'on veut injecter dans la chambre C (voir figure 3.7), on a besoin des mesures de pression fournies par les manomètres d'eau E1 ET E2 ou de mercure M1 et M2. Par conséquent, si on veut voir l'évolution de la pression en fonction du temps dans un milieu industriel ou après injection dans la même chambre, alors l'ajout d'un capteur de pression aux capteurs de température et de styrène est nécessaire.

Le capteur de pression qu'on a choisi est de la série ST2000 [37]. Ce dernier nous offre une précision de 0.5 %, une bonne fiabilité à long terme et il est bon marché. La précision du réglage au laser et le facteur de calibration, donnent à ce capteur une excellente performance à des températures élevées et permettent son interchangeabilité sans calibration. Il englobe dans le même boîtier le transducteur et son conditionneur.

Comme le montre la figure 3.9 ci-dessus, la caractéristique de sortie de ce capteur est linéaire, nous offre une tension de sortie d'un niveau élevé et couvre une gamme de pression allant de 0 à 30 psi.

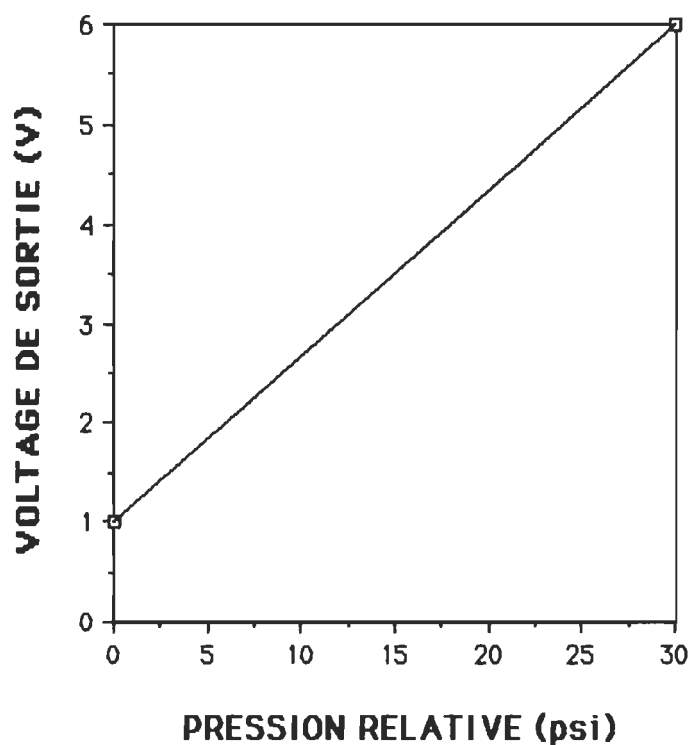


Figure 3.9. Caractéristique de sortie du capteur de pression.

3.2.4. Le microcontrôleur MC68HC11A8

La figure 3.10 ci-dessous représente les éléments essentiels formant le microcontrôleur MC68HC11A8 [39]. Ce dernier est livré en un seul boîtier. Il bénéficie des avantages de la technologie HCMOS qui résident dans la faible consommation des CMOS et la grande immunité aux bruits des HMOS.

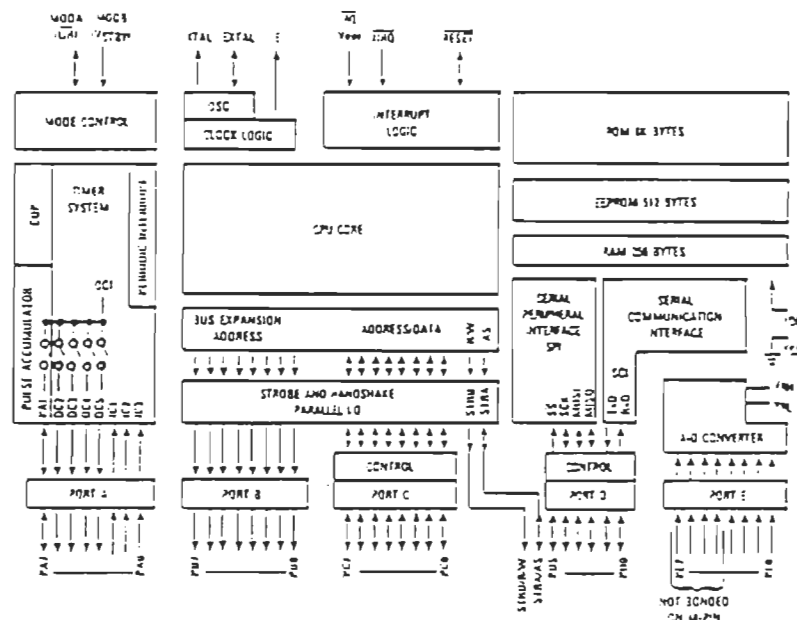


Figure 3.10. Structure interne du microcontrôleur MC68HC11A8.

Parmi les fonctions hautement sophistiquées qu'il intègre il y a :

- un convertisseur analogique-numérique (A/D) de 8 bits à huit canaux d'entrées multiplexés;
- une interface de communication série (SCI) avec une vitesse de transmission variable;
- une interface de périphérique série (SPI) permettant d'interconnecter plusieurs microcontrôleurs entre eux;
- des ports d'entrée/sortie qui peuvent servir plus qu'un seul objectif, dépendamment de la configuration du mode opératoire [39] [40];

- un système de temporisation développé de manière à avoir 3 lignes d'acquisition en entrée, 5 lignes de comparaison en sortie et un circuit d'interruption en temps réel;
- un système de surveillance de bon fonctionnement (COP) qui le protégera contre les défaillances logicielles;
- un système d'horloge programmable qui génère une initialisation dans le cas de perte de perte d'horloge ou lorsque celle-ci est très lente;
- un circuit de détection d'opcode illégal qui produit une interruption non masquable si un opcode illégal est rencontré dans le programme.

La carte mémoire interne du microcontrôleur MC68HC11A8 représentée par la figure 3.11 comprend une R.O.M de huit koctets, une E.E.P.R.O.M de 512 octets et une R.A.M de 256 octets [39].

Cette carte mémoire est configurée selon le mode d'opération utilisé. Par exemple, dans le cas du mode d'opération single chip, aucune adresse mémoire externe n'est générée, les emplacements mémoire interne sont indiqués par les aires hachurés [39] [40]. Le contenu de ces derniers est montré dans le côté droit de la figure 3.11.

Pour mettre en évidence la capacité de ce microcontrôleur, la compagnie Motorola a mis au point la carte d'évaluation E.V.M [41]. Cette

carte constitue un outil efficace pour opérer aussi bien dans la mise au point des programmes utilisateur que dans le mode émulation.

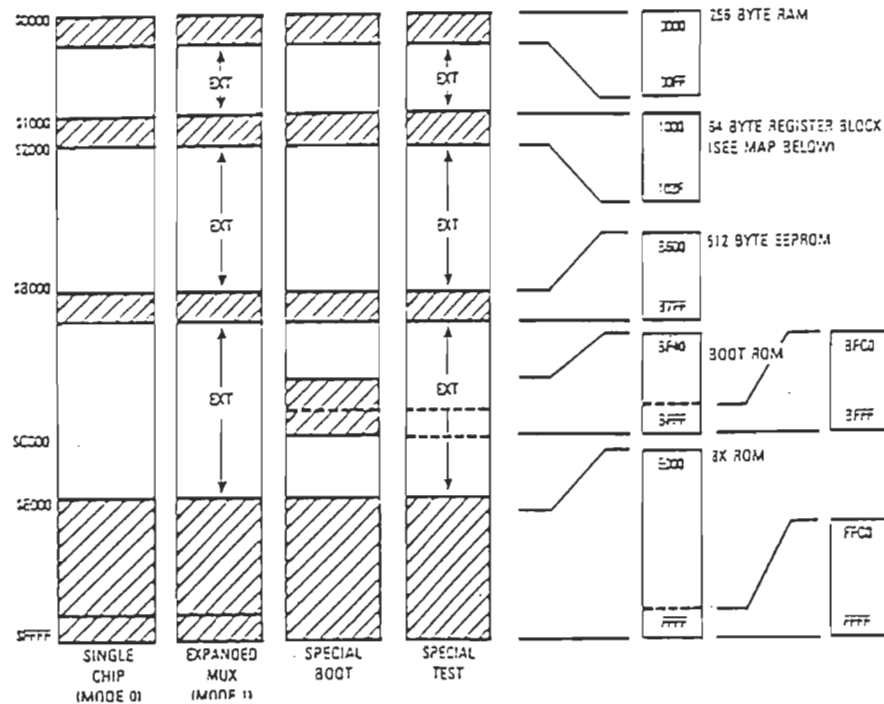


Figure 3.11. Carte mémoire du microcontrôleur
MC68HC11A8.

3.2.5. Système de mesure

Le diagramme en bloc fonctionnel du système de mesure qu'on a mis au point est représenté par la figure 3.12 dont le schéma électrique se trouve dans l'annexe A.3.

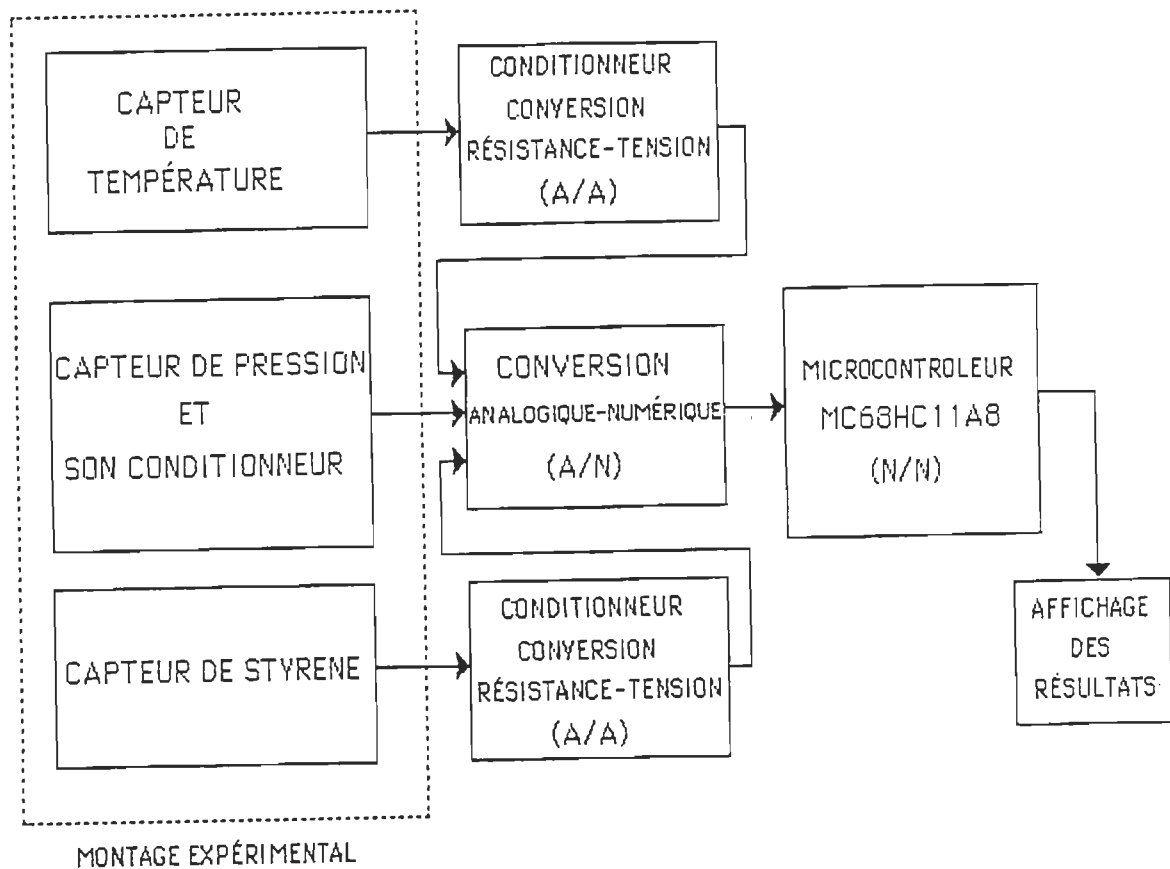


Figure 3.12. Système de mesure pour l'étude du capteur de styrène.

La conversion A/A (analogique-analogique) du signal mesuré consiste à la conversion du paramètre environnemental en résistance avec le transducteur, suivie par la conversion de la résistance en tension effectuée par le conditionneur. Selon l'exactitude recherchée, la conversion A/N (analogique-numérique) de cette tension peut être accomplie par le convertisseur A/N interne du microcontrôleur de 8 bits, ou un convertisseur A/N externe (AD7582) de 12 bits (avec un LSB=1.22 mV).

Le traitement numérique (N/N) est effectué par le microcontrôleur MC68HC11A8. Le logiciel de traitement en virgule flottante [38] et le logiciel qu'on a mis au point (voir annexe A.2) sont nécessaires pour l'estimation de la valeur de la température, de la pression et de la concentration des vapeurs de styrène mesurées avec une précision acceptable.

3.3. MÉTHODES DE LINÉARISATION

Il existe un certain nombre de procédés, dits de linéarisation, qui permettent de corriger le défaut de linéarité d'un capteur ou de son conditionneur éventuel lorsqu'ils présentent dans leur domaine d'emploi des écarts à la linéarité interdisant de considérer la sensibilité comme constante à la précision exigée des mesures. Ces procédés de linéarisation peuvent être classés en deux groupes :

- d'une part ceux qui interviennent sur la source même du signal électrique de façon à linéariser ce dernier dès son origine;
- d'autre part, ceux qui interviennent en aval de la source afin de corriger la non-linéarité du signal qu'elle fournit par un traitement approprié, analogique ou numérique.

Lorsque la courbe d'étalonnage du capteur, qui n'est pas linéaire, présente cependant une plage où le fonctionnement est quasi linéaire, il peut-être possible, dans certains cas, de décaler le point de fonctionnement

dans la zone linéaire en appliquant au capteur un mesurande constant de valeur appropriée. Cette méthode n'est cependant applicable que dans les cas où l'information recherchée est liée aux seules variations du mesurande et est indépendante de la valeur constante à laquelle elles sont superposées.

3.3.1. Méthode analogique de linéarisation

On considère un capteur actif ou passif, associé à son conditionneur, qui est à l'origine d'une tension de mesure V_m fonction non-linéaire du mesurande m auquel il est soumis. A partir de la courbe d'étalonnage ou d'un tableau des valeurs expérimentales associées de V_m et du mesurande m on établit l'équation représentative :

$$m = a_0 + a_1 V_m + a_2 V_m^2 + \dots + a_n V_m^n \quad (3.2)$$

Les $(n+1)$ coefficients a_k sont obtenus en résolvant $(n+1)$ équations correspondant à $(n+1)$ couples de valeurs associées de V_m et de m tirés du tableau ou de la courbe d'étalonnage. Le dispositif de linéarisation recevant la tension V_m à son entrée doit délivrer en sortie une tension V_1 linéarisée c'est-à-dire proportionnelle à m :

$$V_1 = A \cdot m \quad (3.3)$$

soit :

$$V_1 = A (a_0 + a_1 V_m + a_2 V_m^2 + \dots + a_n V_m^n) \quad (3.4)$$

que l'on écrira :

$$V_1 = A_0 + A_1 V_m + A_2 V_m^2 + \dots + A_n V_m^n \quad (3.5)$$

en posant :

$$A_k = A \cdot a_k \quad (3.6)$$

Il en résulte que d'une façon générale un dispositif analogique de linéarisation est réalisable par une association de multiplieurs fournissant les termes $(V_m)^k$ et d'additionneurs pondérés. Cependant, cette méthode présente des inconvénients majeurs. Parmi ces derniers il y a :

- la flexibilité est limitée;
- la compensation et la calibration pour des spécifications individuelles est coûteuse et prend beaucoup de temps.

3.3.2. Principe des méthodes numériques de linéarisation

L'utilisation des méthodes numériques exige évidemment que la

tension de mesure V_m à linéariser soit préalablement convertie sous forme numérique. Une première solution consiste à utiliser une mémoire morte; à chaque valeur de V_m utilisée comme adresse de la mémoire correspond une valeur mémorisée de V_l . De mise en œuvre simple et rapide, cette solution est cependant peu économique car la précision est directement liée à la capacité de la mémoire : par exemple, une erreur maximale de quantification égale au millième de la tension maximum de mesure exige une mémoire de 1 kilomot de 10 bits. Le retard apporté par le dispositif correspond au temps d'accès de la mémoire : il est relativement faible par rapport au temps nécessaire à la conversion de V_m sous forme numérique.

Quand le signal évolue lentement, un système numérique de traitement de données permet d'effectuer la linéarisation par programme avec une rapidité suffisante. La courbe $V_l = f(V_m)$ est découpée en un certain nombre de segments dont sont mémorisées les abscisses des points limites. La tension de mesure V_m est comparée à ce jeu d'abscisses. Le numéro de segment étant alors connu, le programme se poursuit par le calcul de la tension linéaire V_l . En effet, comme dans tout traitement séquentiel, le principal inconvénient réside dans l'importance du temps de réponse exigé par l'ensemble des opérations à effectuer.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

4.1. ETALONNAGE DU CAPTEUR DE TEMPÉRATURE

Les variations de la résistance du capteur de température TD1A [36] liées aux évolutions de la température ne peuvent être traduites sous la forme d'un signal électrique qu'en associant au capteur une source de tension V_S ou de courant I_S et généralement d'autres résistances et amplificateurs constituant alors le conditionneur du capteur (voir figure 4.1).

Pour la recherche d'une bonne sensibilité de mesure, il faut faire traverser la résistance thermométrique par un courant relativement important. Cependant, celui-ci risque alors de provoquer par effet Joule un échauffement du capteur qui peut cesser d'être négligeable et qui en tous cas doit pouvoir être estimé et minimisé : c'est pourquoi le courant de mesure dans notre cas n'excède pas 1 mA. La gamme de température balayée est de 0 à 100°C. La tension de sortie V_0 correspondant est donné par l'équation suivante (voir figure 4.1) :

$$V_0(T) = \frac{R_2}{R_1} [0.001 * R(T) - V_{r2}] \quad (4.1)$$

où les paramètres R_1 , R_2 et V_{r2} doivent être choisis pour que la tension de sortie V_0 soit comprise entre 0 et 5 V.

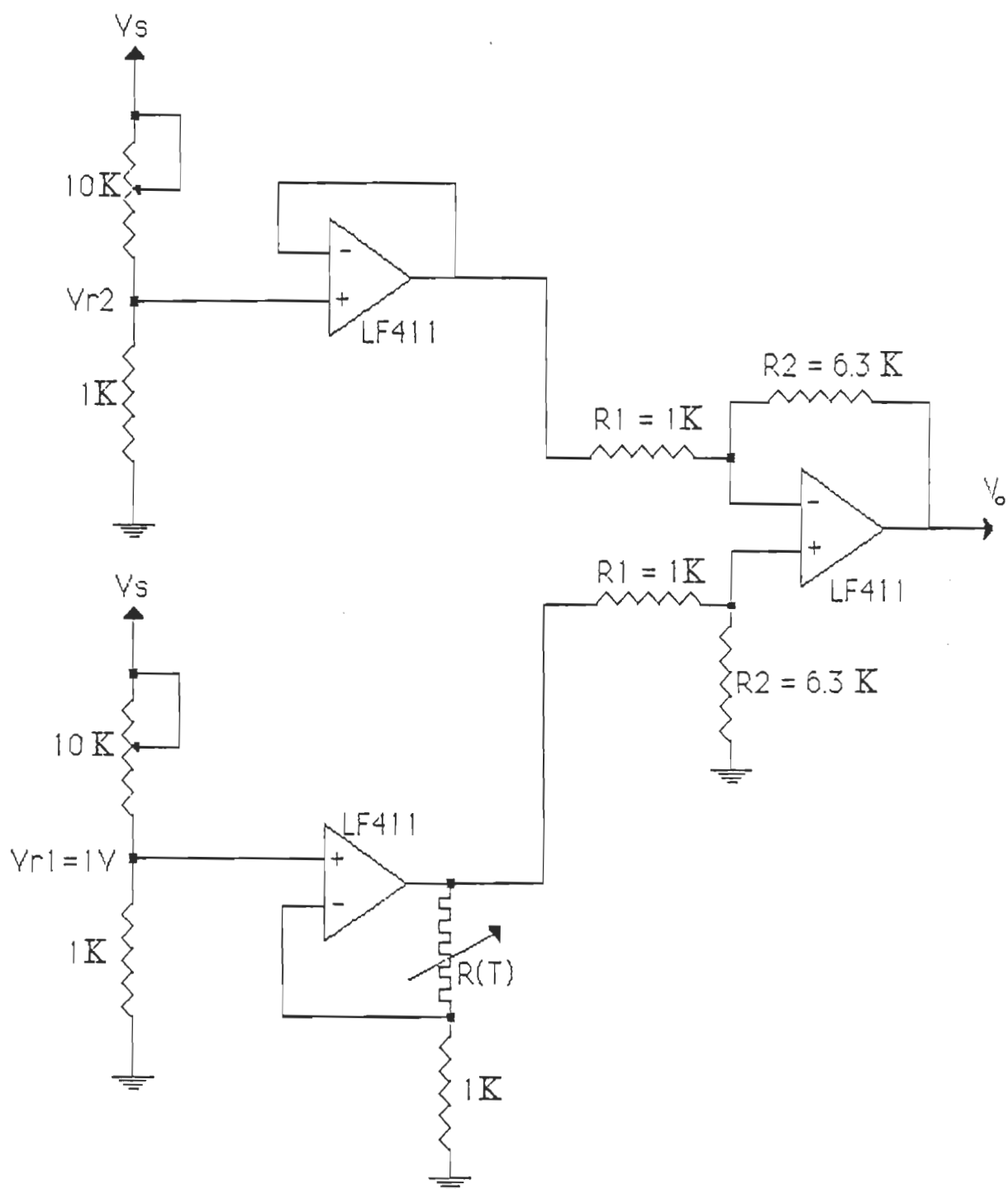


Figure 4.1. Conditionneur du capteur de température.

Pour que la tension de sortie V_o soit égale à 0 à $T = 0^\circ\text{C}$ il faut que :

$$V_{r2} = 0.001 * R(0) \quad (4.2)$$

et pour que $V_o = 5\text{ V}$ à $T = 100^\circ\text{C}$ il faut que :

$$R_2 = R_1 \left[\frac{5000}{R(100) - R(0)} \right] \quad (4.3)$$

Pour l'étalonnage du capteur de température, on a utilisé un four dont la température est contrôlée manuellement. Les résultats obtenus avec le transducteur et son conditionneur sont représentés par le tableau 4.1 et la figure 4.2. L'écart de linéarité obtenu est de 2.8% et la sensibilité du capteur est de $50\text{ mV}/^\circ\text{C}$.

Le système de mesure décrit au chapitre 3 (voir figure 3.10) permet de calculer la valeur de la température mesurée. Grâce à ce système, les résultats de mesures de la température obtenus pour le convertisseur A/N de 8 bits et le convertisseur A/N de 12 bits sont présentés dans le tableau 4.2 et la figure 4.3.

Tableau 4.1. Relation température-tension $V_0(T)$.

TEMPÉRATURE [°C]	TENSION DE SORTIE V_0 [V]
0.00	0.00
5.12	0.23
11.40	0.51
21.57	0.98
30.92	1.43
38.87	1.81
50.61	2.40
60.10	2.88
70.42	3.41
79.26	3.87
90.56	4.48
100.00	5.00

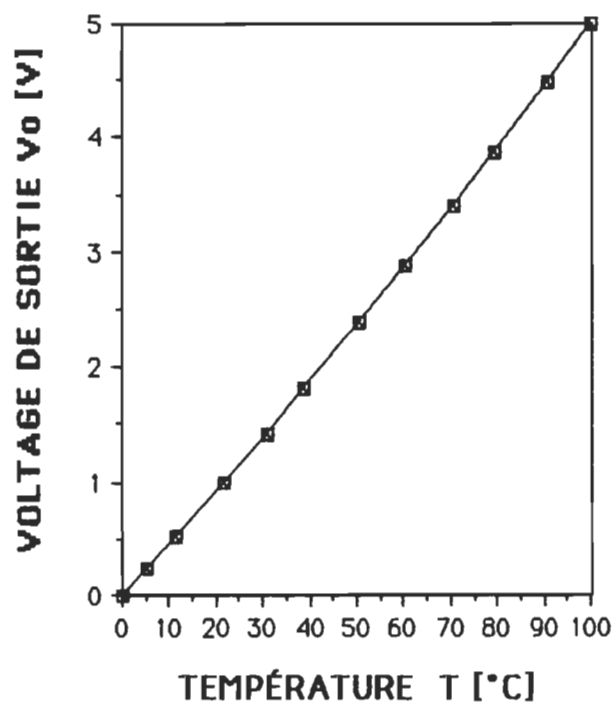


Figure 4.2. Caractéristique de sortie du capteur de température $V_0(T)$.

Tableau 4.2. Erreurs absolues de mesure de la température.

TEMPÉRATURE $T [^{\circ}\text{C}]$	CONVERTISSEUR DE 8 BITS		CONVERTISSEUR DE 12 BITS	
	$T [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$	$T [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T [^{\circ}\text{C}]$
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.12	3.69	1.43	5.11	0.01
11.40	9.84	1.56	11.27	0.13
21.57	20.22	1.35	21.47	0.10
30.92	29.56	1.36	30.78	0.14
38.87	37.49	1.38	38.75	0.12
50.61	49.35	1.26	50.55	0.06
60.10	58.93	1.17	60.11	0.01
70.42	69.47	0.95	70.46	0.04
79.26	78.25	1.01	79.32	0.06
90.56	89.78	0.78	90.53	0.03
100.00	99.83	0.17	99.98	0.02

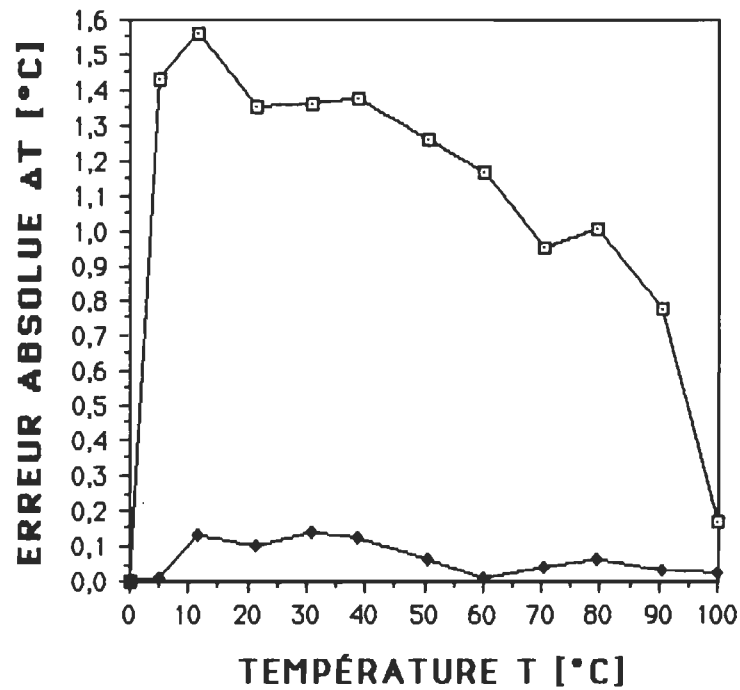


Figure 4.3. Erreur de mesure de la température $\Delta T(T)$.

□ : pour le convertisseur A/N de 8 bits ;

◇ : pour le convertisseur A/N de 12 bits.

L'utilisation du convertisseur A/N de 12 bits engendre une erreur absolue sur la température mesurée qui est moins que 0.06°C . Cependant, l'utilisation du convertisseur A/N interne de 8 bits engendre une erreur absolue qui atteint 1.04°C . Comme le montre cette étude, l'utilisation de l'un des deux convertisseurs A/N dépendra de la précision recherchée sur la mesure de la température.

4.2. ETALONNAGE DU CAPTEUR DE PRESSION

Comme déjà vu au chapitre 3, le capteur de pression englobe

dans le même boîtier le transducteur et son conditionneur [37]. Ainsi, il nous fournit une tension de sortie qui varie entre 1 et 6 V. Le montage de la figure 4.4 nous permet d'adapter cette tension de sortie d'une telle manière qu'elle varie entre 0 et 5 V comme l'exige le convertisseur analogique-numérique.

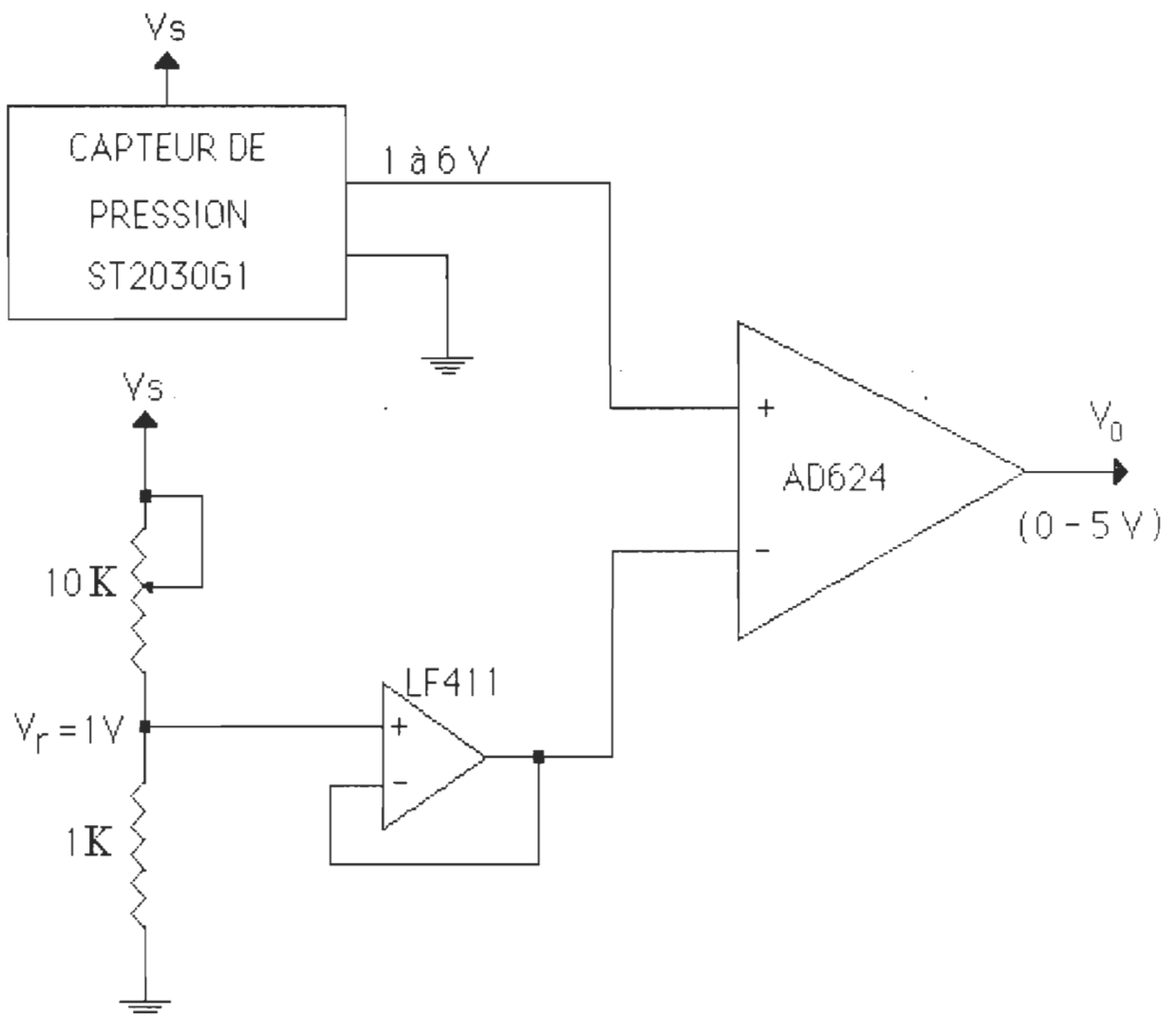


Figure 4.4. Circuit permettant d'adapter la tension de sortie du capteur de pression.

L'étalonnage du capteur de pression muni du circuit de la figure 4.4, nous a permis d'obtenir les résultats représentés dans le tableau 4.3 et la figure 4.5. La caractéristique de sortie obtenue présente un écart de linéarité de 1.8 % et une sensibilité de 0.17 V/psi.

Tableau 4.3. Relation pression-tension $V_o(T)$.

PRESSION RELATIVE [PSI]	TENSION DE SORTIE V_o [V]
0.00	0.00
1.93	0.31
3.92	0.63
5.80	0.96
7.73	1.28
9.67	1.62
11.60	1.96
13.53	2.28
15.47	2.60
17.40	2.93
19.34	3.26
21.27	3.59
23.20	3.92
25.14	4.28
27.07	4.57
30.00	5.00

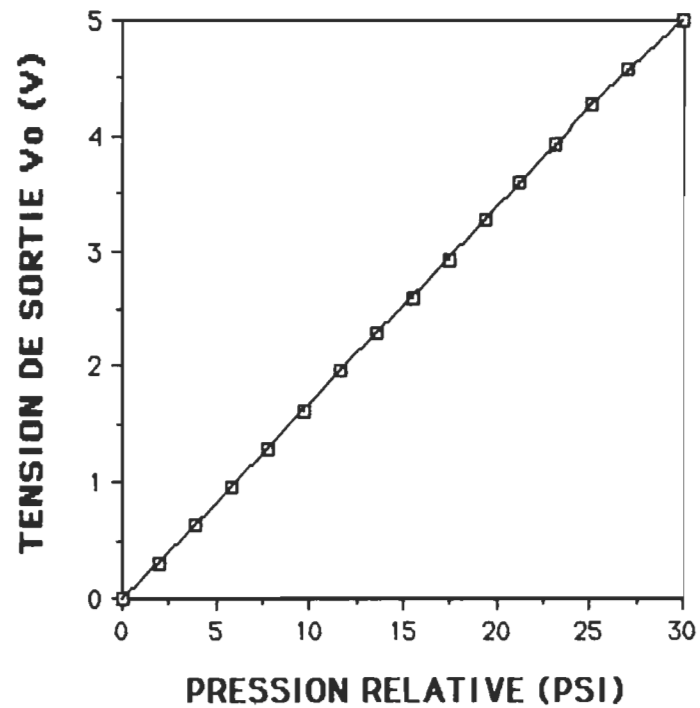


Figure 4.5. Caractéristique de sortie du capteur de pression $V_o(P)$.

Comme dans le cas de la température, les résultats de mesures de la pression obtenus pour le convertisseur A/N de 8 bits et le convertisseur A/N de 12 bits sont présentés dans le tableau 4.4 et la figure 4.6.

Tableau 4.4. Erreurs absolues de mesure de la pression.

PRESSION P [PSI]	CONVERTISSEUR DE 8 BITS		CONVERTISSEUR DE 12 BITS	
	P [PSI]	ΔP [PSI]	P [PSI]	ΔP [PSI]
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.93	1.71	0.22	1.92	0.01
3.92	3.68	0.24	3.90	0.02
5.80	5.65	0.15	5.79	0.01
7.73	7.50	0.23	7.71	0.02
9.67	9.39	0.28	9.64	0.03
11.60	11.39	0.21	11.59	0.01
13.53	13.18	0.35	13.48	0.06
15.47	15.27	0.20	15.46	0.01
17.40	17.22	0.18	17.41	0.01
19.34	19.10	0.24	19.36	0.02
21.27	20.95	0.32	21.23	0.04
23.20	22.92	0.28	23.23	0.03
25.14	24.89	0.25	25.15	0.01
27.07	26.86	0.21	27.06	0.01
30.00	30.00	0.00	30.00	0.00

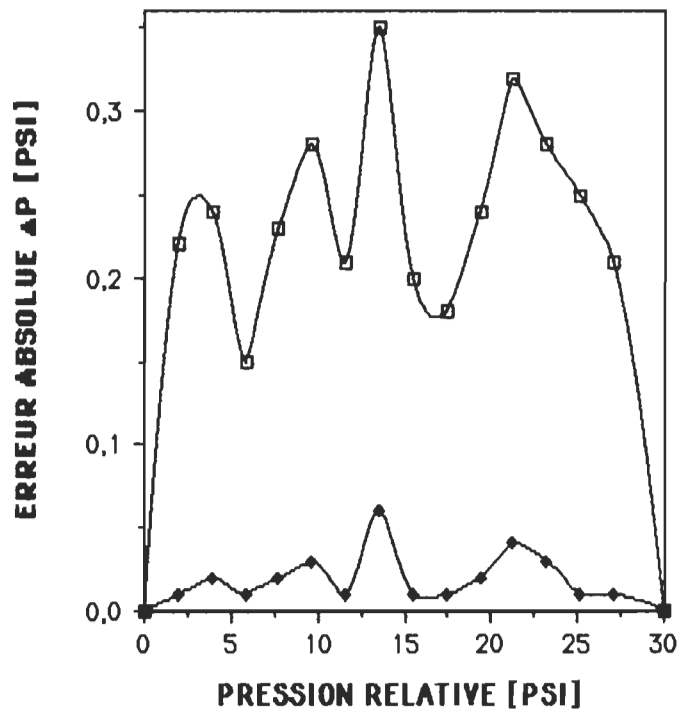


Figure 4.6. Erreur de mesure de la pression $\Delta P(P)$.

□ : pour le convertisseur A/N de 8 bits ;

◇ : pour le convertisseur A/N de 12 bits.

Donc, l'utilisation de l'un des deux convertisseurs A/N dépendra de la précision recherchée sur la mesure de la pression. Le convertisseur A/N de 12 bits (voir annexe A.4) engendre une erreur absolue sur la température mesurée qui est moins que 0.02 psi. Par conséquent, l'utilisation du convertisseur A/N de 8 bits (voir annexe A.4) engendre une erreur absolue qui atteint 0.21 psi.

4.3. ETALONNAGE DU CAPTEUR DE STYRENE

Pour étalonner le capteur de styrène, on a utilisé le montage expérimental (voir figure 3.7) et les deux modes d'opération décrits au chapitre 3. Donc, le calcul de la concentration injectée dépendra comme on va le voir du mode d'opération utilisé.

4.3.1. Le jeu des manomètres

En suivant les étapes décrites au chapitre 3, il est possible d'injecter différentes concentrations des vapeurs de styrène dans la chambre C (voir figure 3.7). Pour avoir une bonne sensibilité aux petites variations de pression dans le ballon B1 et la chambre C, on a remplacé l'eau dans les manomètres E1 et E2 par une huile de densité plus faible que celle de l'eau et qui est de 0.825 g/ml. Les résultats qu'on a obtenus en utilisant cette méthode sont représentés par le tableau 4.5 et la figure 4.7. Le calcul de la concentration des vapeurs de styrène C_S injectée dans la chambre C est donnée par l'expression suivante :

$$C_S = \frac{X_{SB1} * \Delta P_C}{P_C + X_{SB1} * \Delta P_C} * 10^6 \text{ [p.p.m.]} \quad (4.1)$$

où ΔP_C représente la variation de pression fournie par le manomètre E2 (voir figure 3.7) et X_{SB1} représente la fraction molaire à une température donnée des vapeurs de styrène présente dans le ballon B1. Le calcul de

cette dernière est donnée par l'expression suivante :

$$X_{SB1} = \frac{\Delta P_{B1}}{P_{B1} + \Delta P_{B1}} \quad (4.2)$$

où ΔP_{B1} représente la variation de pression indiquée par le manomètre E1 (voir figure 3.7).

Tableau 4.5. Résultats obtenus en utilisant le jeu des manomètres.

TEMPÉRATURE DANS LA CHAMBRE C : $T_c = 58 \text{ }^\circ\text{C}$		
PRESSION DANS LE BALLON B1 ET LA CHAMBRE C : $P_{B1}=P_C= 767.8 \text{ mm Hg}$		
VARIATION DE PRESSION DANS LE BALLON B1 A T_c : $\Delta P_{B1}= 8.55 \text{ mm Hg}$		
$\Delta P_c \text{ [mm Hg]}$	$C_s \text{ [p.p.m.]}$	$V_o \text{ [mV]}$
0	0	0
0.48	6.88	7.30
0.85	12.18	11.43
1.52	21.78	18.25
1.76	25.21	20.12
1.88	26.93	21.40
2.49	35.67	26.30
3.09	44.27	29.30
3.76	53.86	33.12

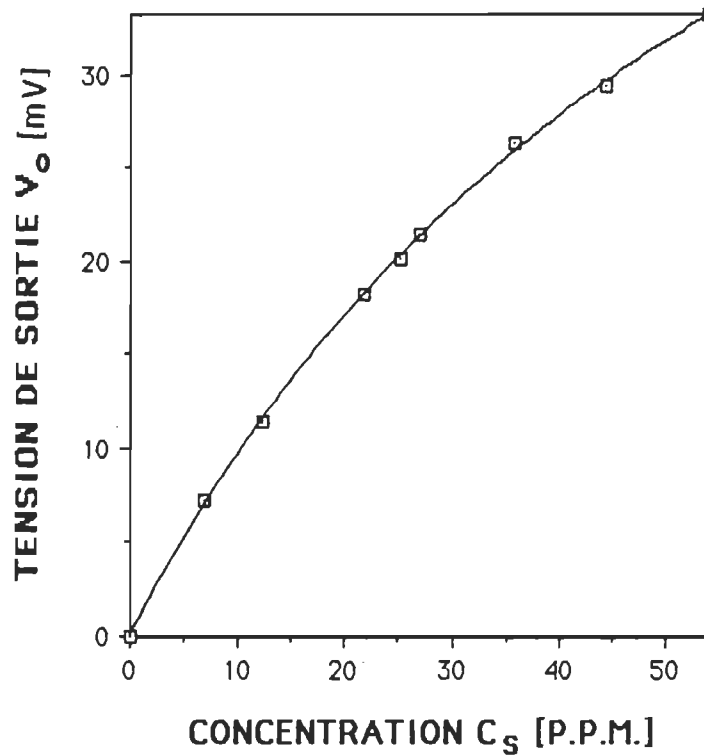


Figure 4.7. Caractéristique de sortie du capteur de styrène en utilisant le jeu des manomètres $V_o(C_s)$.

4.3.2. L'injection par seringue

Comme déjà décrit au chapitre 3, la méthode d'injection par seringue nécessite l'injection d'un volume V_s du styrène liquide qui correspondra à la concentration de vapeur de styrène qu'on veut avoir à l'intérieur de la chambre C. Les résultats obtenus en utilisant cette méthode sont représentés par le tableau 4.6 et la figure 4.8.

Tableau 4.6. Résultats obtenus en utilisant l'injection par seringue.

TEMPÉRATURE DANS LA CHAMBRE C : $T_c = 52\text{ }^{\circ}\text{C}$		
PRESSION DANS LA CHAMBRE C : $P_c = 753.4\text{ mm Hg}$		
$V_s\text{ [ml]}$	$C_s\text{ [p.p.m.]}$	$V_o\text{ [mV]}$
0	0	0
0.001	6.74	7.30
0.002	13.48	11.43
0.003	20.21	16.84
0.004	26.95	20.12
0.005	33.69	23.14
0.006	40.42	26.30
0.007	48.89	30.93
0.008	53.90	33.12
0.009	60.63	34.60
0.010	67.37	36.40
0.012	80.84	41.33
0.015	101.05	47.82
0.020	134.00	57.41
0.030	202.09	75.52
0.040	269.43	91.20
0.045	303.10	99.30

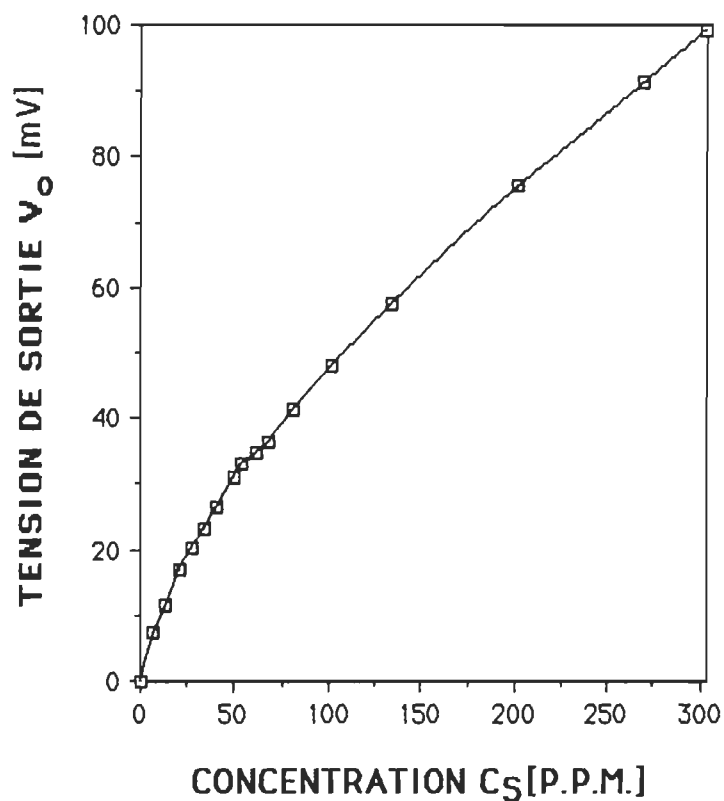


Figure 4.8. Caractéristique de sortie du capteur de styrène en utilisant l'injection par seringue $V_o(C_s)$.

Le calcul de la concentration des vapeurs de styrène C_s est donnée par l'expression suivante :

$$C_s = \frac{p_s \cdot Y_s \cdot R \cdot T_c}{P_c \cdot V_c \cdot M_s + p_s \cdot Y_s \cdot R \cdot T_c} \cdot 10^6 \text{ (P.P.M.)} \quad (4.3)$$

où

T_C : température à l'intérieur de la chambre C en °K

V_S : volume de styrène liquide injecté en ml

ρ_S : densité du styrène qui est de $0.9074 * 10^{-3}$ Kg/ml

M_S : poids moléculaire du styrène qui est de 104.14 Kg/Kmol

P_C : pression à l'intérieur de la chambre C en KPas

V_C : Volume de la chambre C qui est de $34.79 * 10^{-3}$ m³

R : constante des gaz parfait qui est de 8.314 KPas.m³/Kmol.°K

4.4. LINÉARISATION DU CAPTEUR DE STYRENE

Comme on l'a mentionné dans le paragraphe étalonnage du capteur de styrène, la caractéristique de sortie de ce capteur est non-linéaire (voir figure 4.8). La sortie analogique disponible sur ce dernier varie de 0 à 100 mV lorsque le circuit connecté présente une impédance d'entrée supérieure à 50 KΩ. Pour permettre une conversion analogique-numérique adéquate, ce signal doit être amplifié d'une telle manière à avoir une sortie qui varie de 0 à 5 V. Le circuit d'amplification utilisé est représenté par la figure 4.9.

La gamme de concentration balayée est de 0 à 300 p.p.m. La tension de sortie V_0 correspondante est donnée par l'équation suivante :

$$V_0 = \frac{R_1}{R_2} * V_{in} \quad (4.4)$$

où les paramètres R_1 et R_2 doivent être choisis pour que la tension V_0 soit comprise entre 0 et 5 V. La caractéristique de sortie après le circuit d'amplification est représentée par la figure 4.10.

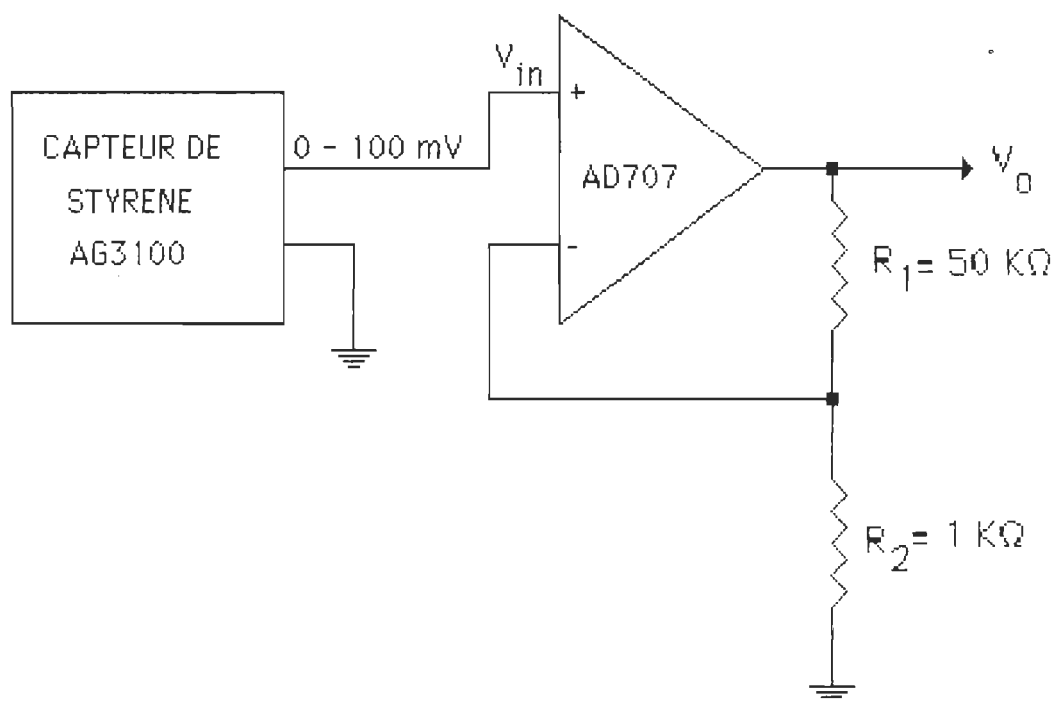


Figure 4.9. Circuit d'amplification associé au capteur de styrène.

Le diagramme en bloc fonctionnel correspondant au système de linéarisation numérique utilisé est résumé dans la figure 4.11.

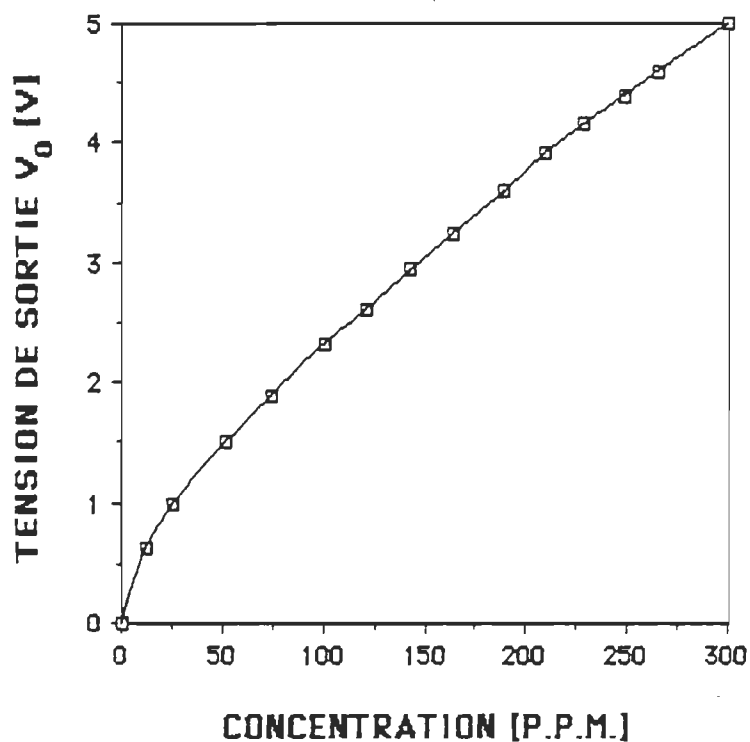


Figure 4.10. Caractéristique de sortie du capteur de styrène après amplification.

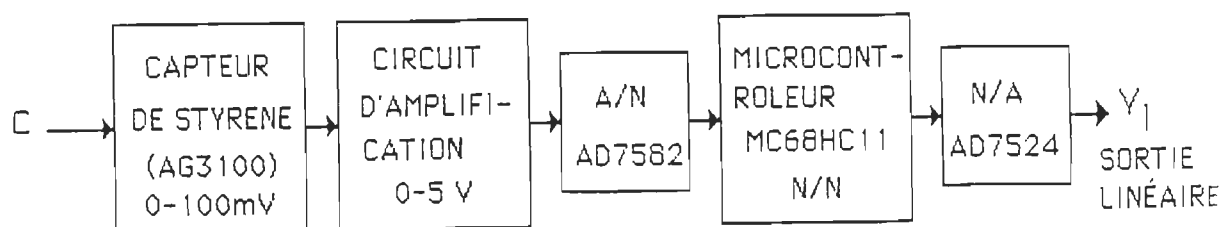


Figure 4.11. Système de linéarisation numérique.

La conversion A/A du signal mesuré consiste à la conversion de la concentration en résistance avec le transducteur, suivie par la conversion de la résistance en tension effectuée par le conditionneur.

Pour avoir plus de précision, la conversion A/N de cette tension est accomplie par un convertisseur A/N de 12 bits (voir annexe A.4) externe au microcontrôleur MC68HC11A8.

Le traitement numérique est effectué par le microcontrôleur MC68HC11A8. Le logiciel de traitement en virgule flottante est nécessaire pour l'estimation de la valeur de la tension linéaire.

La conversion N/A qui fournira la tension linéaire est effectuée par un convertisseur N/A de 8 bits (voir annexe A.4).

Avec le système de linéarisation numérique qu'on vient d'expliquer ci-haut, le résultat obtenu est représenté par la figure 4.12. La caractéristique de sortie est presque parfaitement linéaire. Pour chaque tension d'entrée non-linéaire, on génère à partir du traitement numérique une sortie analogique linéaire. Cela nous a permis d'avoir une sensibilité constante de 16.67 mV/p.p.m sur toute la plage de concentration balayée qui est de 0 à 300 p.p.m.

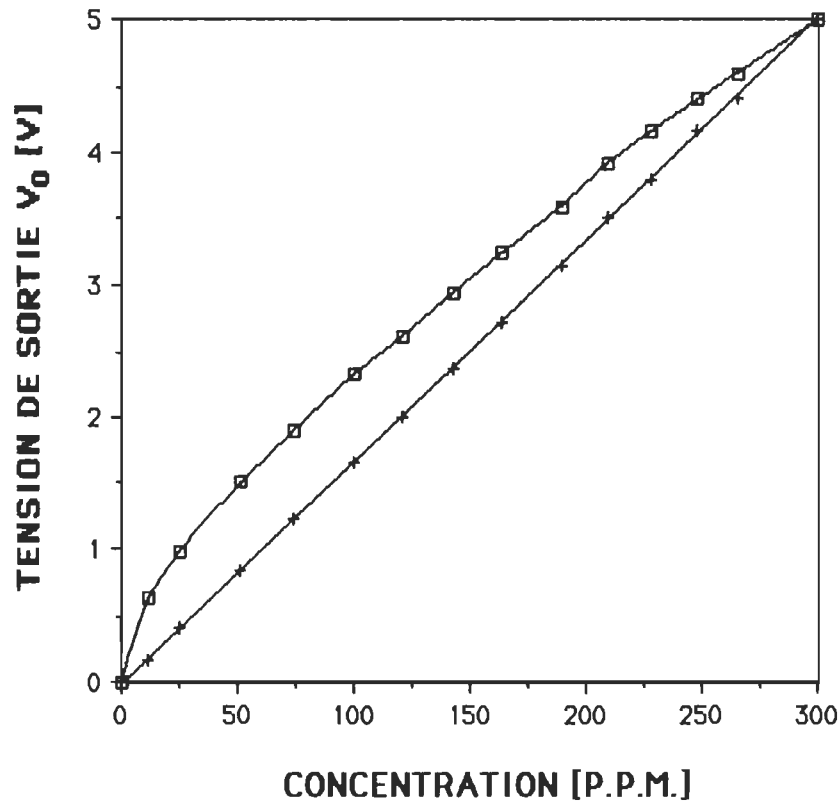


Figure 4.12. Linéarisation du capteur de styrène.

+ : sortie analogique linéaire.

□ : sortie analogique non linéaire.

4.5. ÉTUDE DU CAPTEUR DE STYRENE EN FONCTION DE CERTAINES GRANDEURS D'INFLUENCE

Pour évaluer la performance du capteur de styrène dans un milieu industriel réel, on a étudié son comportement en fonction de certaines grandeurs qui peuvent affecter sa caractéristique de sortie. Cette étude sera divisée en deux étapes qui vont nous permettre de comprendre le fonctionnement de ce capteur.

A. Première étape

Cette première étape consiste à vérifier si le capteur de styrène détecte d'autres gaz en plus des vapeurs de styrène, on a donc essayé de voir son comportement en présence d'hydrogène. Pour cette expérience, on a injecté différentes concentrations de ce dernier dans la chambre C de la même manière que pour les vapeurs de styrène en utilisant le jeu des manomètres.

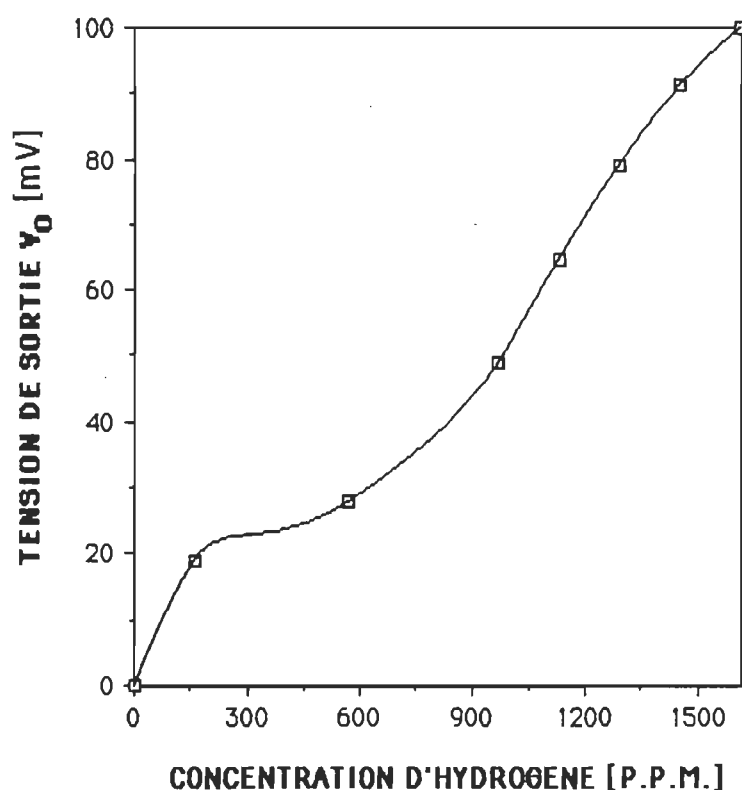


Figure 4.13. Caractéristique de sortie du capteur de styrène en présence de l'hydrogène.

Comme le montre la figure 4.13, ce capteur n'est pas sélectif. Il peut détecter tout gaz, comme l'hydrogène, qui est capable de réagir avec son transducteur. Ceci posera un problème dans le cas où les vapeurs de styrène se trouvent mélangées avec d'autres gaz. Les informations qui seront fournies par ce capteur seront erronées.

B. Deuxième étape

Dans cette manipulation, le but est de voir le fonctionnement du capteur de styrène dans le temps. Pour cela, on a injecté deux concentrations des vapeurs de styrène dans la chambre C pendant des intervalles de temps différents. Le résultat obtenu est représenté par la figure 4.14.

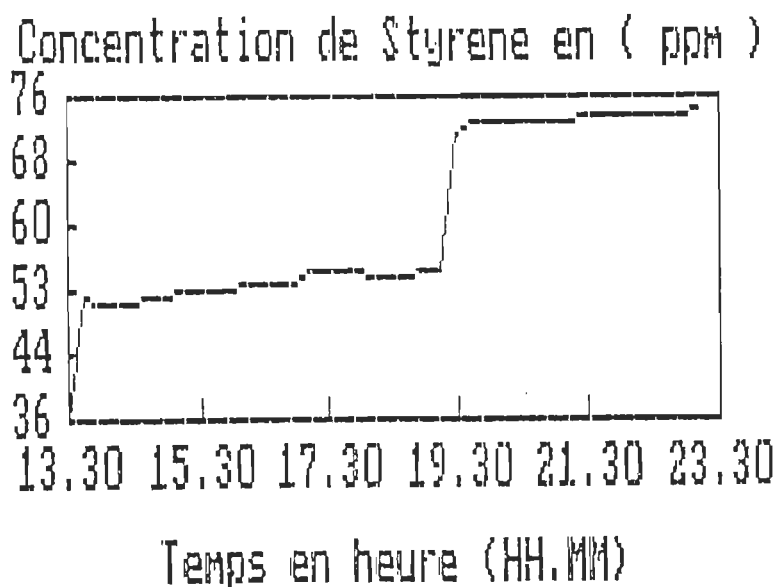


Figure 4.14. Evolution de la concentration des vapeurs de styrène en fonction du temps.

Le premier palier représente la première concentration injectée et qui est autour de 53 p.p.m. Le deuxième palier représente une concentration de 74 p.p.m qui correspond à la deuxième concentration injectée. Comme le montre la figure 4.14, une fois que la concentration des vapeurs de styrène est égale partout dans la chambre C le capteur de styrène affiche une valeur stable. Ceci explique la nécessité d'un agitateur à l'intérieur de la chambre C.

4.6. DISCUSSIONS

Pour avoir une bonne précision sur la mesure de la température, de la pression et de la concentration des vapeurs de styrène, la conversion analogique-numérique dans le capteur intelligent (produit final) sera effectuée par le convertisseur A/N de 12 bits (voir annexe A.4) externe au microcontrôleur MC68HC11A8.

Le problème qu'on a rencontré en utilisant la méthode du jeu des manomètres pour étalonner le capteur de styrène est l'impossibilité de balayer la gamme de concentration allant de 0 à 300 p.p.m. Donc, pour résoudre ce problème, la méthode d'injection par seringue était utilisée. Ceci nous a permis de voir que la caractéristique de sortie du capteur de styrène est non-linéaire entre 0 et 50 p.p.m et quasi-linéaire entre 50 et 300 p.p.m.

La mise en évidence du problème de sélectivité que présente ce

capteur pose un sérieux obstacle. Pour le résoudre, il faut premièrement identifier les gaz que ce capteur est capable de détecter et par la suite trouver le moyen de calculer la concentration des vapeurs de styrène présente dans un mélange de gaz. La méthode qu'on suggère d'utiliser ultérieurement (voir annexe A.1) pour résoudre ce problème repose sur le principe de la multidétection décrit au chapitre 2.

CHAPITRE 5

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Dans ce travail de recherche, l'utilisation du montage expérimental simulant le milieu industriel a permis d'étudier et de voir le comportement du capteur de styrène en fonction de certains paramètres. L'amélioration de ce capteur par l'ajout d'une intelligence locale (le micro-contrôleur MC68HC11A8), des circuits de conditionnement et de l'électronique de contrôle et de décision l'a intégré au rang des capteurs intelligents. Parmi les avantages offerts par ce capteur amélioré il y a :

- l'amélioration de la sensibilité, de linéarité, de précision et d'immunité aux interférences;
- la standardisation du format des signaux de sortie;
- la réduction en nombre et en dimension des composants.

Les autres avantages inhérents sont :

- l'accroissement de la fiabilité et de la vitesse de réponse;
- l'expansion de la gamme d'opération.

Concernant la flexibilité d'exploitation, ce capteur amélioré permet d'envisager des fonctions nouvelles génératrices d'une plus grande

qualité d'information et d'une sûreté accrue de fonctionnement au niveau du système. Par ailleurs, il nous offre les possibilités suivantes :

- l'implantation de la redondance et la capacité d'auto-diagnostic à distance permettant d'accroître considérablement la crédibilité des informations délivrées;
- l'augmentation de la rapidité et l'efficacité de la maintenance du matériel;
- l'intégration dans un réseau local avec diverses architectures possibles;
- de la configuration à distance;
- l'implantation de la multidétection.

Le principe de cette dernière possibilité qu'on veut utiliser ultérieurement pour résoudre le problème de sélectivité que présente le capteur de styrène donne des résultats très satisfaisants. Cependant, son application n'est pas chose facile, il faut respecter les exigences et les critères demandés pour aboutir au but visé. La fiabilité de la méthode de traitement qu'on suggère (voir annexe A.1), repose sur un choix judicieux du micro-contrôleur et des composants constituant les circuits de conditionnement des signaux issus des transducteurs. L'application de ce principe de détection, nécessite une étude sur la caractéristique de sortie des transducteurs utilisés en faisant varier certains paramètres environnementaux comme l'humidité et la température. L'action de ces derniers peut avoir un effet significatif qui modifierait les mesures.

Pour faciliter et compléter l'étude du capteur de styrène, on suggère certaines améliorations au niveau du montage expérimental qui sont les suivantes :

- il faut remplacer la chambre C où se trouvent les capteurs par une cloche conçue spécialement pour aller dans des pressions élevées. Ceci permettra, par exemple, de faire une purge en faisant le vide dans la cloche;
- remplacer les manomètres E1, E2, M1 et M2 par des capteurs de pression très sensibles aux petites variations. Ceci permettra de prendre des mesures plus précises et qui peuvent être traitées numériquement;
- pour pouvoir utiliser le jeu des manomètres afin de balayer la gamme de concentration allant de 0 à 300 p.p.m, il faut trouver le moyen de chauffer le styrène liquide qui se trouve dans le ballon B2 jusqu'à ébullition. Alors, on suggère de placer les ballons B1 et B2 à l'extérieur du bain thermostaté en les gardant tout près de ce dernier. Ceci évitera une condensation des vapeurs de styrène dans la tuyauteries reliant les ballons B1 et B2 à la chambre C;
- pour faciliter l'accès aux valves pendant les manipulations, on suggère de les avoir au-dessus du niveau d'eau dans le bain thermostaté.

BIBLIOGRAPHIE

1. Transducers '85 International Conference on Solid-state Sensors and Actuators, pp 11-14, juin 1985.
2. IKEGAMI, A., and KANEYASU, M., Transducers 85, Digest of Technical Papers, pp 136, 1985.
3. MULLER, M.R., LANGE, E., and HINTERSTOCHER, A., Transducers 85, Digest of Technical Papers, pp 81, 1985.
4. ZAROMB, S., BATTIN, R., PENROSE, R.W., STETTER, R.J., and V. C. STAMONDIS, Proc. 2nd Int. Meeting on Chem. Sensors, Bordeaux, July 7-10, pp 739, 1986.
5. HASKARD, M. R. "Microelectronic Sensor Technology". Journal of physics, section E, Vol.19, pp. 891-896, 1986.
6. FAVENNEC, J.M., "Smart Sensor in Industry", J. Ph. : Sc. Instrum., Vol. 20, No. 9, pp 1087-1090, 1987.
7. HAL HALMAN, "Intelligent Sensor : The Merging of Electronics and Sensing", TECHNICAL INSIGHT, INC. Englewood/Fort Lee, NJ.
8. Wise, K. D., "The Role of Thin Films in Integrate Solide-state Sensors". Journal of Vacuum Scince and Thecnology A, May/June, No. 4, pp. 617-622, 1986.
9. Hoffheins, B. S., "Intelligent Thick-film Gas Sensor". Proceeding of the International Symposium on Microelectronics, Atlanta, GA, pp. 154-160, 1986.

10. COLLETTE G. , "Le Choix Des Capteurs", La Documentation Française, Paris,1977.
11. ATLAS, E. and GIAM, C.S., Science (USA), Vol. 211, No 4478, pp 163-165, 1981.
12. ACKERMAN, M., FRIMONT, D., MULLER, C., and WVEBBLES, O.J., Pure and Appl. Geophys. (Switzerland), Vol. 117, NO. 3, pp 367-380, 1979.
13. THURSTON, G. D., and LIOY, P. J., Atmos. Environ. (GB), Vol. 21, No. 3, pp 687-698, 1987.
14. ENGLISH, R. M. et al., Atmos. Environ. (GB), Vol. 18, No. 11, pp 2345-2380, 1984.
15. COULTER, K. E. KEHDE, H. and KISCOKK, B. F., Styrene and Related Monomers "in" Vinyl and Dienes Monomers, Part. 2, Wiley, pp 479-576, 1971.
16. BROWN, W. D., Arzona Medecine, Vol: 41, No. 7, pp 474-478, 1984.
17. SANTODONATO, T. et al., Monograph on Human Exposure to Chemicals in the Workplace : Styrene. Center for Chemical Hazard Assesment. Syracuse Research Corporation. Report No SRC- TR- 84- 1124, July 1985.
18. BEDORE, M., DROZ, P-O and GUILLEMIN, M., International Archives of Occupational and Environmental Health, Vol. 55, No. 4, pp 331-336, May 1985.
19. Revue de la Commission de Santé et de la Sécurité du Travail du Québec "Prévention au Travail", Vol. 3, No. 10, pp 5-7, Novembre/Décembre 1990.
20. GUILLEMIN, M. and BEAUR, D. International Archives of Occupational

- and Environmental Health, Vol. 44, No. 4, pp 249-263, 1979.
- 21.** LOF, A. E. and al., Scandinavian Journal of Work, Environment and Health, Vol. 12, No. 1, pp 70-74, 1986.
 - 22.** KARBOWSKI, R. J. and BRAUM, W. H., Journal of Chromatography, Vol. 160, pp 141-145, 1978.
 - 23.** ANONYM. Styrene in Air. Laboratory Methode Using Porous Polymer Absorbent Tubes, Thermal Desorption and Gaz Chromatography, Health and Safety Executive Occupational Medecine and Hygiene Laboratory, pp 1-4, 1983.
 - 24.** VAN ROOSMALEN, P. B. and DRUMMOND, I., British Journal of Industriel Medecine, Vol. 35, pp 56-60, 1978.
 - 25.** OGATA, M. SUGIHARA, R. Japanese Journal of Industriel Health, Vol. 20, pp 218-219, 1978.
 - 26.** ANONYM, Styrene, Industrial Chemical Exposure : Guidelines for Biological Monitoring, Biomedical Publications, Davis, Cal. U.S.A, pp 71-80, 1983.
 - 27.** VAN DEN HEOD, N. VAN ASSELEN, O. and VAN DONGEN, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., Vol. 48, No. 3, pp 252-256, 1987.
 - 28.** LOPER, G. L., SASAKI, G.R. and STAMPS, M. A., Appl. Opt., Vol. 21, No. 9, pp 1648-1653, 1982.
 - 29.** TODD, W. F. and SHULMAN, S. A., American Hygiene Association Journal, Vol. 45, No. 12, pp 817-825, 1984.
 - 30.** DARRON, B., Design News, pp 24-25, 1987.
 - 31.** GIACHINO, J. M., Journal of Physics, No. 19, pp 891-896, 1986.
 - 32.** HENKEL, S., Sensors, pp 22-31, 1987.

- 33.** MCILVAINE, W. B., Managin Automation, pp 50-51, 1987.
- 34.** Capteurs 84 - Paris 5-7 Juin 1984 (CIAME) :
 Détecteur de gaz par capteur semi-conducteur. - J. BERNARD, J. M. SIGNIER, J. P. MATTEI, M. BERTHERAT.
 Dispositif de détection sélectif à certain gaz : interprétation des phénomènes observés sur SnO₂ après traitement chimique. - R. LALAUZE, N. D. BUI, C. PIJOLAT.
- 35.** BERGVELT, P., DE ROOIJ, ZEMEL, J. N., "Physical mechanisms for chemically sensitive semiconductor devices", *Nature* 273, pp 438, 1978.
- 36.** MICRO SWITCH a Honeywell Division, "Specifier's Guide for Solid State Sensors", Catalog 20 Issue 8, 1986.
- 37.** Pressure Sensor Handbook, "SENSYM", 1988.
- 38.** G. DOUGHMAN, "Floating point package", Technical Softwar Description, Motorola, 1986.
- 39.** MOTOROLA, "MC68HC11 Reference Manual". Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 07632. By Motorola Inc., 1989.
- 40.** MOTOROLA, "MC68HC11E9 Programming Reference Guide". By Motorola Inc., 1989.
- 41.** MOTOROLA, "MC68HC11 EVM Evaluation Board, User Manuel", Manuel MC68HC11 EVM/D1, Septembre 1986.
- 42.** NORME NATIONAL DU CANADA, "Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie", CAN/CGSB-158.1-1987.

ANNEXES

ANNEXE A.1

METHODE ET ALGORITHME DE TRAITEMENT DES DONNEES DE MULTIDÉTECTION

Avant d'expliquer la méthode d'identification utilisée, il sera avantageux de définir certains paramètres.

G_0 : la conductivité électrique de l'élément de détection mesurée sans la présence d'aucun gaz détectable par le transducteur,

G : la conductivité électrique de l'élément de détection mesurée en présence d'un gaz détectable par le transducteur.

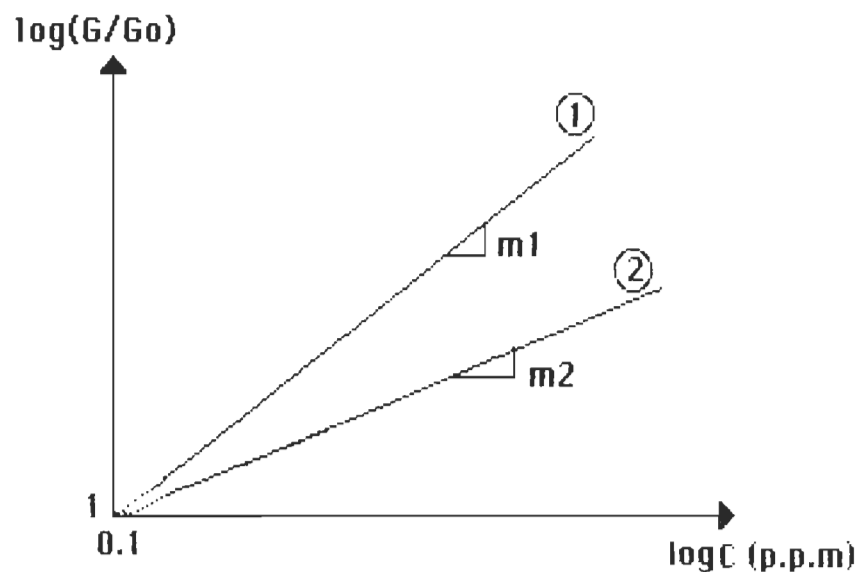


Figure A1.1. Réponse de l'élément de détection au gaz 1 et 2.

La caractéristique de détection illustrée dans la figure A1.1 peut être exprimée mathématiquement sous la forme suivante :

$$G/G_0 = b * (C + 1)^m \quad (1)$$

où

m : valeur caractéristique représentant la sensibilité de l'élément de détection à un gaz donné,

b et 1 : des valeurs de correction pour ajuster l'origine du système de coordonnées logarithmique.

Pour satisfaires les conditions limites données par :

$$G/G_0 = 1 \quad \text{et} \quad C = 0$$

(2)

il faut que :

$$b = 1^{-m}$$

(3)

Avec l'expression 3 prise en considération, l'équation 1 peut être reformulée de la façon suivante :

$$G/G_0 = (a * C + 1)^m \quad (4)$$

où

a : coefficient de correction ou un facteur pour ajuster l'origine du système de coordonnées. Il dépend de la sorte de gaz détectée-

En généralisant l'équation 4 pour N éléments de détection et M sortes de gaz on obtient :

$$\left(\frac{G}{G_0} \right)_j = (a_i * C + 1)^{m_{ij}} \quad (5)$$

où

$i=1,2,\dots,M$ et $j=1,2,\dots,N$

a_i : facteur de correction pour le gaz i ,

m_{ij} : la sensibilité de l'élément de détection j au gaz i .

Quand les deux termes de l'expression 5 sont réécrits logarithmiquement et transformés dans la manière définie par l'expression 6, la valeur numérique p_{ji} qui est indépendante de la concentration peut être obtenue par l'expression 7 :

$$\begin{aligned} \frac{\text{Log} \left(\frac{G}{G_0} \right)_j}{\sum_{j=1}^N \text{Log} \left(\frac{G}{G_0} \right)} &= \frac{\text{Log} (a_i C + 1)^{m_{ij}}}{\sum_{j=1}^N \text{Log} (a_i C + 1)^{m_{ij}}} \\ &= \frac{m_{ij} \text{Log} (a_i C + 1)}{\text{Log} (a_i C + 1) \sum_{j=1}^N m_{ij}} \end{aligned} \quad (6)$$

$$= \frac{m_{ij}}{\sum_{j=1}^N m_{ij}} = p_j^i \quad (7)$$

De l'expression 7, il est évident que la valeur numérique p_{ji} satisfait la condition donnée par l'expression suivante :

$$\sum_{j=1}^N p_j^i = 1 \quad (8)$$

Le nombre des coefficients p_{ji} qui peuvent être utilisés comme des coefficients standard correspond au nombre d'espèces de gaz qui peuvent être identifiés. Par comparaison des coefficients calculés x_j (voir algorithmes) à partir des signaux fournis par les N éléments de détection et des coefficients standards p_{ji} qui sont déterminés expérimentalement, il est possible d'identifier les gaz présents dans le milieu à étudier.

Dans la méthode d'identification mentionnée ci-dessus, le concept de distance dans l'espace Euclidien de N dimension est utilisé. Plus particulièrement, la distance d^i entre deux vecteurs est calculée selon l'expression suivante :

$$d^i = \sum_{j=1}^N (x_j - p_j^i)^2 \quad (9)$$

où

x_j : représente le coefficient calculé du j ème élément de détection.

il faut que dans ce cas aussi la relation suivante soit satisfaite :

$$\sum_{j=1}^N x_j = 1 \quad (10)$$

où la classe i est déterminé lorsque d_{\min} donnée par la relation 11 est satisfaite.

$$d_{\min} = \min_i [d_i] \quad (11)$$

Donc, la sorte ou l'espèce de gaz qui se trouve en contact avec l'élément de détection peut être identifiée. Quand les coefficients standard p_{ji} qui sont indépendants de la concentration donnée par l'expression 7 ne sont plus valables, c'est-à-dire lorsqu'une sorte de gaz dont le coefficient de détection subit des changements en fonction de la variation de la concentration du gaz, alors il faut prendre d'autres considérations qui valideront cette méthode. Donc, on a en réalité deux cas qui se présentent.

Premier cas :

Dans ce cas, le coefficient de détection est très proche de l'un

des coefficients standard et significativement différent des autres. Assumons que cette sorte de gaz est représentée par l'indice i , l'ensemble des coefficients de détection $[p_k^i]$ où $k=1,2,\dots,L_i$ est déterminé pour L_i qui représente différentes concentrations du gaz i . Ces différentes concentrations sont prises respectivement comme une seule classe à travers la procédure décrite ci-après pour calculer la distance d_i . De ce fait, on peut déterminer analytiquement la similarité.

Dexième cas :

Dans ce cas le coefficient de détection dévie significativement des coefficients standard en fonction de la concentration. Pour résoudre le problème, la région entière de concentration est divisée en Q sous régions r ($r=1,2,\dots,Q$). Ceci donne un coefficient de détection qui est différent dans les sous régions. Donc, l'ensemble des coefficients de détection $[p_{kr}]$ où $k=1,2,\dots,L_r$ est déterminé pour différentes concentrations L_r dans chaque sous région r comme dans le premier cas.

Dans ces conditions, le degré de similarité entre les classes et les coefficients de détection est défini comme une fonction de distance de la manière suivante :

$$s^i = \frac{1}{L^i} \sum_{k=1}^{L^i} \sum_{j=1}^N \omega_j^i (x_j - p_{kj}^i) \quad (12)$$

où

s_i : représente le degré de similarité,

x_j et p_{kj}^i : représentent le j ième élément du vecteur x et p_k^i respectivement,
 w_j^i : représente une pondération.

Cette dernière est donnée par l'expression 13.

$$\omega_j^i = \frac{1}{(\sigma_j^i)^2 \sum_{j=1}^N \frac{1}{(\sigma_j^i)^2}} \quad (13)$$

où σ_j^i représente la dispersion et elle est donnée par :

$$(\sigma_j^i)^2 = \left[\frac{1}{L_i} \sum_{k=1}^i (p_{kj}^i)^2 - \left[\frac{1}{L_i} \sum_{k=1}^i p_{kj}^i \right]^2 \right] \quad (14)$$

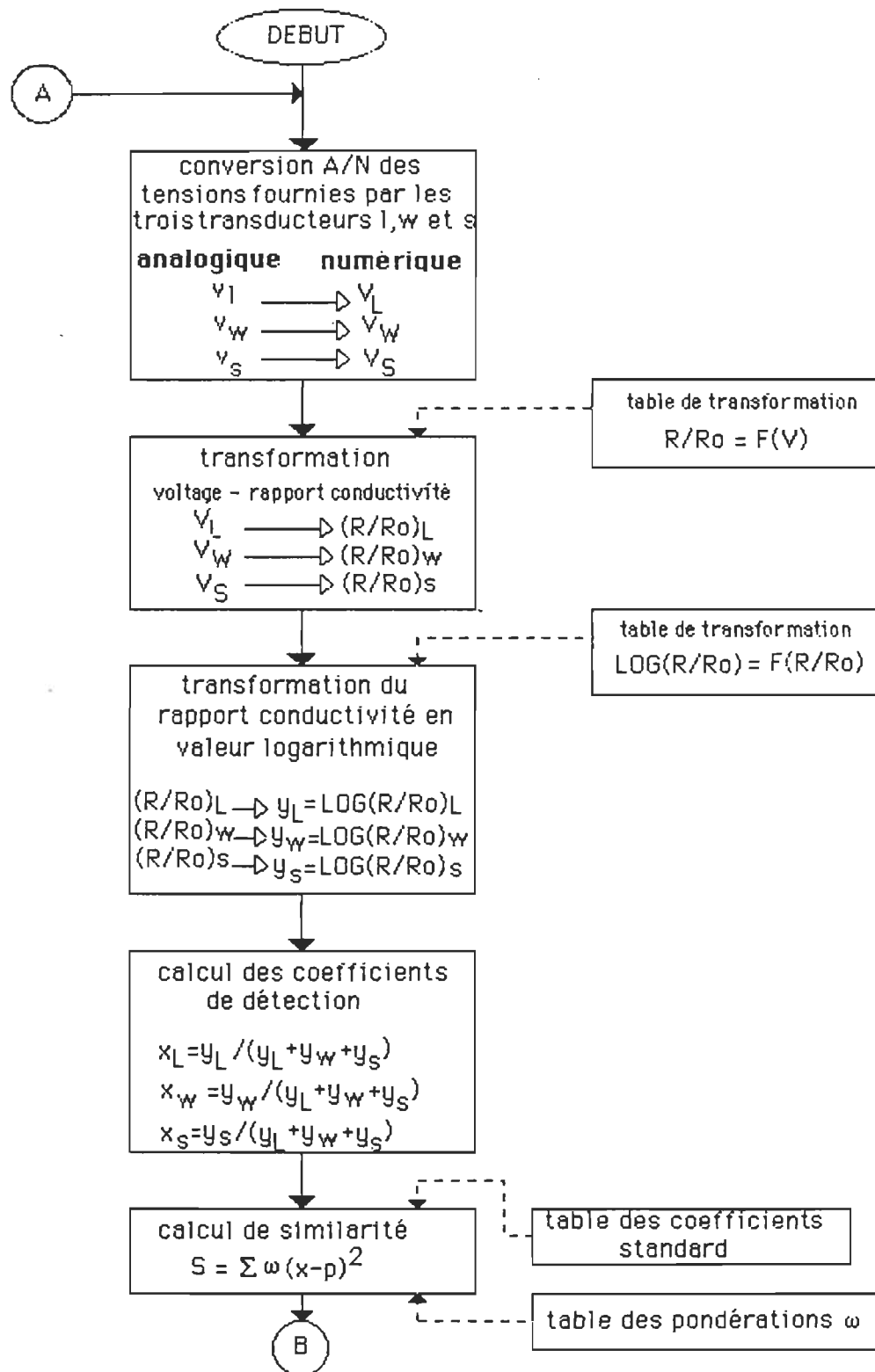
De cette façon, la condition suivante est satisfaite :

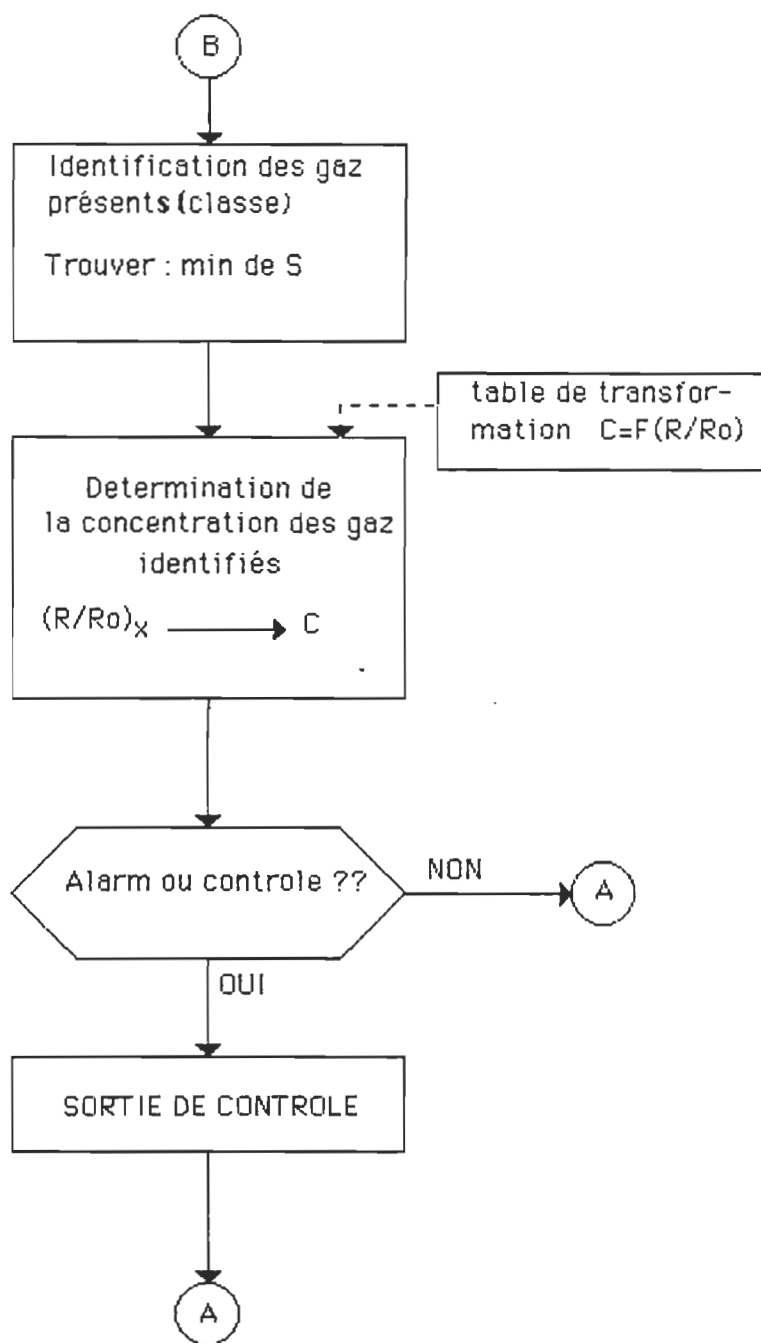
$$\sum_{j=1}^N \omega_j^i = 1 \quad (15)$$

Lorsque la classe i est déterminée, la condition 16 est satisfaite pour la similarité s^i obtenue de l'expression 12, est que, le gaz qui entre en con-

$$s_{\min} = \min [s^i] \quad (16)$$

tacte avec l'élément de détection peut être identifié comme le gaz qui appartient à la même classe. Une fois que la classe est identifiée, il est relativement simple de calculer la concentration des gaz présent dans l'échantillon (voir algorithmes). Ceci est possible grâce aux données déjà obtenues expérimentalement.





ANNEXE A.2

PROGRAMME PERMETTANT DE CALCULER LA VALEUR DE LA CONCENTRATION DES VAPEUR DE STYRENE, DE LA TEMPÉRATURE, DE LA PRESSION ET DE LA SORTIE ANALOGIQUE LINÉAIRE

* Déclaration des variables *

	ORG	\$0000
NOMBRE	RMB	12
FPACC1EX	RMB	1
FPACC1MN	RMB	3
MANTSGN1	RMB	1
FPACC2EX	RMB	1
FPACC2MN	RMB	3
MANTSGN2	RMB	1
COMPTEUR	RMB	1
MEMOT	RMB	14
MEMOP	RMB	14
MEMOS	RMB	14
*		
*		
NUMERO	EQU	\$31
OYFERR	EQU	2
UNFERR	EQU	3

```

DIVOERR      EQU      4
PORTB        EQU      $04
PORTE        EQU      $0A
PORTC        EQU      $03
DDRC         EQU      $07
ADCTL        EQU      $30
OPTION       EQU      $39
ADR1         EQU      $31
ADR2         EQU      $32
ADR3         EQU      $33
ADR4         EQU      $34
PROG         EQU      $3B
BAUD         EQU      $102B
SCCR1        EQU      $102C
SCCR2        EQU      $102D
SCSR         EQU      $102E
SCDR         EQU      $102F

```

```

*
```

```

*
```

```

*
```

```

*****
```

```

* Programme principal *
```

```

*****
```

```

*
```

```

                                ORG      $E000
                                LDS      *$00FF      INITIALISATION DE LA PILE
                                LDAB     *0
                                STAB     SCCR1          INITIALISATION DES REGISTRES
                                LDAB     *$0C          PERMETTANT DE DÉTERMINER LA
                                STAB     SCCR2          VITESSE DE TRANSMISSION ET DE
                                LDAB     *$35          RECEPTION DES DONNÉES.
                                STAB     BAUD
TOUJOUR JSR      TEMPERA      CALCUL DE LA TEMPÉRATURE.
        JSR      PRESSIO     CALCUL DE LA PRESSION.
        JSR      STYRENE     CALCUL DE LA CONCENTRATION DES
        JSR      INPSCI      VAPEURS DE STYRENE.
        LDAA     SCDR        LIRE LE BYTE CORRESPONDANT AU

```

	ANDA	*\$7F	CAPTEUR AVEC LEQUEL ON VEUT
	CMPA	*NUMERO	DIALOGUER.
	BNE	TOUJOUR	OUI. AFFICHE LE RESULTAT EN
	JSR	TRANASC2	UTILISANT LE PORT DE COMMUNI-
	JMP	TOUJOUR	CATION SÉRIAL.
*			
*			
*			

* Routine permettant de calculer *			
* la valeur de la température. *			

*			
TEMPERA	EQU	*	
	LDAA	*\$24	CHOIX DU CANAL ANIO DU CONVER-
*			TISSEUR A/N (AD7582).
	JSR	VOLTAGE	CONVERSION DU VOLTAGE LU.
	JSR	PLACED1	PLACER LE RESULTAT DE LA CON-
	LDAA	NOMBRE	VERSION DANS FPACC1.
	BEQ	ZEROT	OUI.CONVERSION DE FPACC1 EN CA-
	LDX	*\$B600	RACTERES ASCII.
	JSR	VLEPROM	PLACER 5.00 DANS FPACC2.
	JSR	FLTMUL	FPACC1*FPACC2 -----> FPACC1
	LDX	*\$B604	
	JSR	VLEPROM	PLACER 4095 DANS FPACC2.
	JSR	FLTDIV	FPACC1/FPACC2 -----> FPACC1
	LDX	*\$0000	POINTER L'ADRESSE 0000H
	JSR	PUTFPAC1	PLACER FPACC1 DANS L'ADRESSE

```

*                                0000H.

      JSR      GETFPAC2      FPACC2 <----- FPACC1
      JSR      FLTMUL        FPACC1*FPACC2 -----> FPACC1
      LDX      *$B608
      JSR      VLEPROM        PLACER (-0.43948) DANS FPACC2.
      JSR      FLTMUL        FPACC1*FPACC2 -----> FPACC1
      LDX      *$0004        POINTER L'ADRESSE 0004H.
      JSR      PUTFPAC1      PLACER FPACC1 DANS L'ADRESSE
*                                0004H.

      LDX      *$B60C
      JSR      VLEPROM        PLACER 22.151 DANS FPACC2.
      JSR      PLACED1        PLACER LE RESULTAT DE LA CON-
*                                VERSION DANS FPACC1.

      JSR      FLTMUL        FPACC1*FPACC2 -----> FPACC1
      JSR      PLACED2        PLACER LE CONTENU DE L'ADRESSE
*                                00004H DANS FPACC2.

      JSR      FLTADD        FPACC1+FPACC2 -----> FPACC1
      LDX      *$B610
      JSR      VLEPROM        PLACER 0.13774 DANS FPACC2.
      JSR      FLTADD        FPACC1+FPACC2 -----> FPACC1
ZEROT  LDX      *MEMOT
      JSR      FLTASC        CONVERSION DU CONTENU DE
*                                FPACC1 EN CARACTERES ASCII.

      RTS
*

```

```

*
*
*****

* Routine permettant de calculer *
* la valeur de la pression.      *
*****

*
PRESSIO      EQU      *
              LDAA     *$26      CHOIX DU CANAL AN1 DU CONVER-
                                      TISSEUR A/N (AD7582).
              JSR      VOLTAGE   CONVERSION DU VOLTAGE LU.
              JSR      PLACED1   PLACER LE RESULTAT DE LA CON-
                                      VERSION DANS FPACC1.
*
              LDAA     NOMBRE
              BEQ      ZEROP     OUI.CONVERSION DE FPACC1 EN CA-
*
                                      RACTERES ASCII.

              LDX      *$B600
              JSR      VLEPROM   PLACER 5.00 DANS FPACC2.
              JSR      FLTMUL    FPACC1*FPACC2 -----> FPACC1
              LDX      *$B604
              JSR      VLEPROM   PLACER 4095 DANS FPACC2.
              JSR      FLTDIV    FPACC1/FPACC2 -----> FPACC1
              LDX      *$B614
              JSR      VLEPROM   PLACER 40.766 DANS FPACC2.
              JSR      FLTMUL    FPACC1*FPACC2 -----> FPACC1
              LDX      *$B618
              JSR      VLEPROM   PLACER 0.57750 DANS FPACC2.
              JSR      FLTADD     FPACC1+FPACC2 -----> FPACC1

```

```

ZEROP      LDX      *MEMOP
           JSR      FLTASC      CONVERSION DU CONTENU DE
*                                     FPACC1 EN CARACTERES ASCII.
           RTS
*
*
*
*****
* Routine permettant de calculer *
* la valeur de la concentraion des*
* vapeurs de styrene.             *
*****
*
STYRENE    EQU      *
           LDAA     *$25        CHOIX DU CANAL AIN2 DU CONVER-
*                                     TISSEUR A/N (AD7582).
           JSR      VOLTAGE     CONVERSION DU VOLTAGE LU.
           JSR      PLACED1     PLACER LE RESULTAT DE LA CON-
*                                     VERSION DANS FPACC1.

           LDAA     NOMBRE
           BNE      NZEROS      OUI.CONVERSION DE FPACC1 EN CA-
*                                     RACTERES ASCII.

           JMP      ZEROS
NZEROS     LDX      *$B600
           JSR      VLEPROM     PLACER 5.00 DANS FPACC2.
           JSR      FLTMUL      FPACC1*FPACC2 -----> FPACC1
           LDX      *$B604
           JSR      VLEPROM     PLACER 4095 DANS FPACC2.

```

	JSR	FLTDIV	FPACC1/FPACC2 -----> FPACC1
	LDX	*\$0000	POINTER L'ADRESSE 0000H.
	JSR	PUTFPAC1	PLACER FPACC1 DANS L'ADRESSE
*			0000H.
	LDX	*\$B61C	
	JSR	VLEPROM	PLACER 0.52698 DANS FPACC2.
	JSR	FLTMUL	FPACC1*FPACC2 -----> FPACC1
	LDX	*\$B620	
	JSR	VLEPROM	PLACER 0.7177 DANS FPACC2.
	JSR	FLTADD	FPACC1+FPACC2 -----> FPACC1
	LDX	*\$0004	
	JSR	PUTFPAC1	PLACER FPACC1 DANS L'ADRESSE
			0004H.
	LDX	*\$0000	
	JSR	GETFPAC1	PLACER LE RESULTAT DE LA CON-
*			VERSION DANS FPACC1.
	JSR	GETFPAC2	PLACER LE RESULTAT DE LA CON-
*			VERSION DANS FPACC2.
	JSR	FLTMUL	FPACC1*FPACC2 -----> FPACC1
	LDX	*\$0008	
	JSR	PUTFPAC1	PLACER FPACC1 DANS L'ADRESSE
*			0008H.
	LDX	*\$B624	
	JSR	VLEPROM	PLACER 30.581 DANS FPACC2.
	JSR	FLTMUL	FPACC1*FPACC2 -----> FPACC1
	LDX	*\$0004	
	JSR	GETFPAC2	PLACER LE CONTENU DE L'ADRESSE
*			0004H DANS FPACC2.
	JSR	FLTADD	FPACC1+FPACC2 -----> FPACC1
	LDX	*\$0004	
	JSR	PUTFPAC1	PLACER FPACC1 DANS L'ADRESSE
*			0004H.
	LDX	*\$0000	
	JSR	GETFPAC1	PLACER LE RESULTAT DE LA CON-
*			VERSION DANS FPACC1.
	LDX	*\$0008	

	JSR	GETFPAC2	PLACER LE CONTENU DE L'ADRESSE
*			0008H DANS FPACC2.
	JSR	FLTMUL	FPACC1*FPACC2 -----> FPACC1
	LDX	*\$0008	
	JSR	PUTFPAC1	PLACER FPACC1 DANS L'ADRESSE
*			0008H.
	LDX	*\$B628	
	JSR	VLEPROM	PLACER (-6.3130) DANS FPACC2.
	JSR	FLTMUL	FPACC1*FPACC2 -----> FPACC1
	LDX	*\$0004	
	JSR	GETFPAC2	PLACER LE CONTENU DE L'ADRESSE
*			0004H DANS FPACC2.
	JSR	FLTADD	FPACC1+FPACC2 -----> FPACC1
	LDX	*\$0004	
	JSR	PUTFPAC1	PLACER FPACC1 DANS L'ADRESSE
*			0004H.
	LDX	*\$0000	
	JSR	GETFPAC1	PLACER LE RESULTAT DE LA CON-
*			VERSION DANS FPACC1.
	LDX	*\$0008	
	JSR	GETFPAC2	PLACER LE CONTENU DE L'ADRESSE
*			0008H DANS FPACC2.
	JSR	FLTMUL	FPACC1*FPACC2 -----> FPACC1
	LDX	*\$B62C	
	JSR	VLEPROM	PLACER 0.51461 DANS FPACC2.

```

        JSR      FLTMUL      FPACC1*FPACC2 -----> FPACC1
        LDX      *$0004
        JSR      GETFPAC2    PLACER LE CONTENU DE L'ADRESSE
*                                0004H DANS FPACC2.
        JSR      FLTADD      FPACC1+FPACC2 -----> FPACC1
ZEROS   LDX      *MEMOS
        JSR      FLTASC      CONVERSION DU CONTENU DE
*                                FPACC1 EN CARACTERES ASCII.

        RTS

*
*
*
*****
* Routine permettant de calculer *
* la valeur de la sortie analogique *
* linéaire pour le capteur de styrène.*
*****
*
LINEAIRE EQU      *
        LDX      *$B630
        JSR      VLEPROM     PLACER 0.85 DANS FPACC2.
        JSR      FLTMUL      FPACC1*FPACC2 -----> FPACC1
        LDAB     FPACC1MN     VÉRIFIER SI LE RÉSULTAT EST NUL
        BEQ      ZEROL2      OUI. ENVOYER ZERO A LA SORTIE.
        LDAA     FPACC1EX     NON. METTRE LE RESULTAT SOUS
        CMPA     *$80         FORME DE 8 BITS.

```

```

                BLS      ZEROL1
LIMITE          CMPA     *$88
                BEQ      ZEROL2
                CLC
                RORB
                INCA
                JMP      LIMITE
ZEROL1          CLRB
ZEROL2          LDAA     *$FF
                LDX      *$1000
                STAA     DDRC,X
                STAB     PORTC,X
                RTS

```

*

*

*

* Routine permettant de déclencher et de détecter *

* le début et la fin de conversion. Le résultat de la *

* conversion sera placé sous forme de 4 bytes com-*

* me l'exige les routines de calcul en virgule flot- *

* tante. *

*

```

VOLTAGE        EQU      *
                LDX      *$1000      POINTER L'ADRESSE 1000H.
                LDAB     *$8C        PLACER 8CH DANS LE REGISTRE AB.
                STAB     COMPTEUR    PLACER 8CH DANS COMPTEUR.
                JSR      STACONV     DEBUTER LA CONVERSION.
                JSR      ENDCONV     DETECTER LA FIN DE CONVERSION.
                JSR      RESULTAT    PLACER LE RESULTAT SOUS FORME

```

```

*                                     DE 4 BYTES.
*
*   RTS
*
*
*
*****
*Routine permettant de placer le résultat du voltage *
* lu par le convertisseur analogique-numérique sous *
* forme de 4 bytes comme l'exige les routines de cal-*
* cul en virgule flottante. *
*****
*
RESULTAT    EQU    *
            ASLD          DECALER A GAUCHE DE 1 BIT LE
*                                     RESULTAT.
            ASLD
            ASLD
            ASLD
            BNE    NOZERO    NON. PLACER 00H DANS FPACC1
            CLR    COMPTEUR  PLACER 00H DANS COMPTEUR.
            JMP    PREPARE
NOZERO      BMI
            SET          OUI. SAUVER LE RESULTAT DE LA
*                                     CONVERSION.
NOSET       DEC    COMPTEUR  DECREMENTE DE 1 COMPTEUR.
            ASLD          DECALER A GAUCHE DE 1 BIT LE RE-
*                                     SULTAT.

```

	BPL	NOSET	NON. SAUVER LE RESULTAT DE LA
*			CONVERSION.
SET	ANDA	*\$7F	INDIQUER QUE LE RESULTAT EST
*			POSITIF.
PREPARE	STD	NOMBRE+1	SAUVER LE RESULTAT DE LA CON-
*			VERSION.
	CLRA		MISE A ZERO DE L'ACCUMULATEUR A
	STAA	NOMBRE+3	PLACER 00H DANS LE DERNIER BYTE
*			DU RESULTAT.
	LDAA	COMPTEUR	PLACER DANS LE PREMIER BYTE DU
*			RESULTAT LE NOMBRE DE BITS
*			AVANT LA VIRGULE.
	STAA	NOMBRE	
	RTS		

*

*

*

* Routine permettant de déclencher le début d'une *

* conversion analogique-numérique effectuée par *

* le convertisseur A/N AD7582 DE 12 BITS. *

*

STACONV EQU *

STAA PORTB,X

ORAA *\$08

STAA PORTB,X

RTS

*

*

*

```
*****
* Routine permettant la détection de la fin de la *
* conversion analogique-numérique. Le résultat *
* est placé dans l'accumulateur D. *
*****
```

```
*
ENDCONV      EQU      *
              LDAA     #$0C
              STAA     PORTB,X
NOYET        LDAA     PORTE,X
              BMI      NOYET
              LDAB     #$08
              STAB     PORTB,X
              LDAB     PORTE,X
              RTS
```

```
*
```

```
*
```

```
*
```

```
*****
```

```
* Routines permettant de manipuler les *
* résultats. *
```

```
*****
```

```
*
```

```
PLACED1      EQU      *
              LDX      #$0000
              JSR      GETFPAC1
              RTS
```

```

*
*
PLACED2      EQU      *
              LDX      #$0004
              JSR      GETFPAC2
              RTS

*
*
*
*****
* Routine permettant de lire l'EEPROM. *
*****
*
VLEPROM      EQU      *
              LDY      #$1000
              LDAA     PROG,Y
              ANDA     #$02
              BEQ      VALIDE
              LDAA     #$00
              STAA     PROG,Y
VALIDE       JSR      GETFPAC2
              RTS

*
*
*
```

```
*****
* Routines permettant d'initialiser et d'utiliser *
* le port de communication sériel pour la r ce- *
* ption et la transmission des données.          *
*****
```

```
*
TRANASC2 EQU *
          LDX    *MEMOS
          JSR    TRANASC1
          LDX    *MEMOT
          JSR    TRANASC1
          LDX    *MEMOP
          JSR    TRANASC1
          JSR    FIN
          RTS
```

```
*
```

```
*
```

```
TRANASC1 EQU *
          LDAA   0,X
          CMPA   *$30
          BNE    TRANS1
          JSR    ECRIO

TRANS1   LDAB   *$05
ENCORE   LDAA   0,X
          CMPA   *$20
          BNE    CONTINU
```


	LDAA	#\$30
CONTINU	JSR	TRANSMIS
	DECB	
	BNE RTS	ENCORE
*		
*		
ECRIO	EQU	*
	PSHX	
	LDAB	#\$30
	LDAA	#\$04
ENCOR1	INX	
	STAB	0,X
	DECA	
	BNE	ENCOR1
	PULX	
	RTS	
*		
*		
FIN	EQU *	
	LDAA	#\$46
	JSR	OUTSCI
	ANDA	#\$7F
	STAA	SCDR
	JSR	DLY10
	RTS	
*		
*		
TRANSMIS	EQU	*

```

                                PSHB
                                JSR      OUTSCI
                                ANDA     *$7F
                                STAA     SCDR
                                JSR      DLY10
                                INX
                                PULB
                                RTS

*

*

INPSCI      EQU      *
TEST        LDAB     SCSR

            BITB     *$20
            BEQ      TEST
            RTS

*

*

OUTSCI      EQU      *
TEST1       LDAB     SCSR

            BITB     *$80
            BEQ      TEST1
            RTS

*

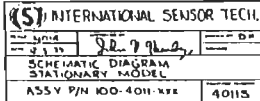
*

*
```

```
*****  
* Routine permettant de générer un *  
* délai de 10 secondes.           *  
*****  
  
*  
DLY10      EQU      *  
            PSHX  
            LDX      *$FFFF  
  
DLOOP      DEX  
            BNE      DLOOP  
            PULX  
            RTS  
  
*  
            END.  
  
*          FIN DU PROGRAMME.
```

ANNEXE A.3

SCHÉMA ÉLECTRIQUE DU SYSTEME DE MESURE ET DU CAPTEUR DE STYRENE



ANNEXE A.4

DOCUMENTS TECHNIQUES CONCERNANT LES COMPOSANTS UTILISÉS



CMOS 12-Bit Successive Approximation ADC

AD7582

FEATURES

- 12-Bit Successive Approximation ADC
- Four High Impedance Input Channels
- Analog Input Voltage Range of 0 to +5V with Positive Reference of +5V
- Conversion Time of 100 μ s per Channel
- No Missed Codes Over Full Temperature Range
- Low Total Unadjusted Error ± 1 LSB max
- Autozero Cycle for Low Offset Voltage
- Monolithic Construction

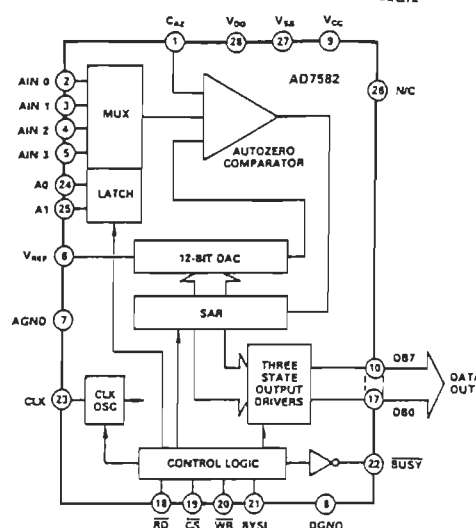
GENERAL DESCRIPTION

The AD7582 is a medium speed, 4-channel 12-bit CMOS A/D converter which uses the successive approximation technique to provide a conversion time of 100 μ s per channel. An auto-zero cycle occurs at the start of each conversion resulting in very low system offset voltages, typically less than 100 μ V. The device is designed for easy microprocessor interface using standard control signals; \overline{CS} (decoded device address), \overline{RD} (READ) and \overline{WR} (WRITE). The 4-channel input multiplexer is controlled via address inputs A0 and A1.

Conversion results are available in two bytes, 8LSB's and 4MSB's, over an 8-bit three state output bus. Either byte can be read first. Two converter busy flags are available to facilitate polling of the converter's status.

The analog input voltage range is 0V to +5V when using a reference voltage of +5V. The four analog inputs are all high impedance inputs with tight channel-to-channel matching—typically 0.1LSBs.

AD7582 FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD7582 is a complete 4 channel 12-bit A/D converter; either a 28-pin DIP or 28-terminal surface mount package requiring only a few passive components and a voltage reference.
2. Autozero cycle realizes very low offset voltages, typically 100 μ V.
3. The four channel input multiplexer (user addressable) features high input impedance and excellent channel-to-channel matching.
4. Standard microprocessor control signals to allow easy interfacing to most popular 8- and 16-bit microprocessors.

ORDERING INFORMATION¹

Total Unadjusted Error $T_{min} - T_{max}$	Temperature Range and Package Options ²		
	0 to +70°C	-25°C to +85°C	-55°C to +125°C
± 1 LSB	Plastic (N-28) AD7582KN	Hermetic ³ (D-28) AD7582BD	Hermetic ³ (D-28) AD7582TD
± 1 LSB	PLCC ⁴ (P-28A) AD7582KP		LCCC ⁵ (E-28A) AD7582TE

NOTES

¹To order MIL-STD-883, Class B processed parts, add/883B to part number.

Contact your local sales office for military data sheet.

²See Section 14 for package outline information.

³Analog Devices reserves the right to ship either ceramic (package outline D-28) or cerdip (package outline Q-28) hermetic packages.

⁴PLCC: Plastic Leaded Chip Carrier.

⁵LCCC: Leadless Ceramic Chip Carrier.



CMOS 8-Bit Buffered Multiplying DAC

AD7524

FEATURES

- Microprocessor Compatible (6800, 8085, Z80, Etc.)
- TTL/CMOS Compatible Inputs
- On-Chip Data Latches
- End Point Linearity
- Low Power Consumption
- Monotonicity Guaranteed (Full Temperature Range)
- Latch Free (No Protection Schottky Required)

APPLICATIONS

- Microprocessor Controlled Gain Circuits
- Microprocessor Controlled Attenuator Circuits
- Microprocessor Controlled Function Generation
- Precision AGC Circuits
- Bus Structured Instruments

GENERAL DESCRIPTION

The AD7524 is a low cost, 8-bit monolithic CMOS DAC designed for direct interface to most microprocessors.

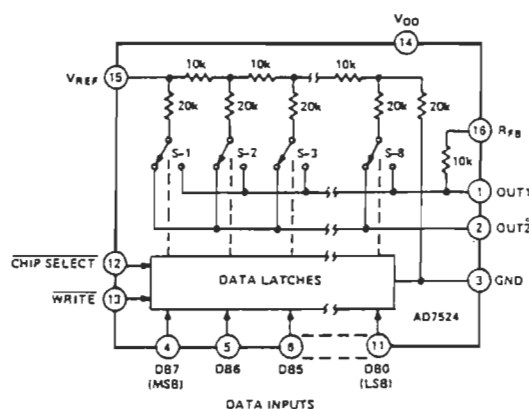
Basically an 8-bit DAC with input latches, the AD7524's load cycle is similar to the "write" cycle of a random access memory. Using an advanced thin-film on CMOS fabrication process, the AD7524 provides accuracy to 1/8LSB with a typical power dissipation of less than 10 milliwatts.

A newly improved design eliminates the protection Schottky previously required and guarantees TTL compatibility when using a +5V supply. Loading speed has been increased for compatibility with most microprocessors.

Featuring operation from +5V to +15V, the AD7524 interfaces directly to most microprocessor buses or output ports.

Excellent multiplying characteristics (2- or 4-quadrant) make the AD7524 an ideal choice for many microprocessor control, gain setting and signal control applications.

AD7524 FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



ORDERING INFORMATION¹

Nonlinearity (V _{DD} = +15V)	Temperature Range and Package Options ^{2,3}		
	-40°C to +85°C	-40°C to +85°C	-55°C to +125°C
	Plastic DIP (N-16)	Hermetic (Q-16)	Hermetic (Q-16)
±1.2LSB	AD7524JN	AD7524AQ	AD7524SQ
±1.4LSB	AD7524KN	AD7524BQ	AD7524TQ
±1.8LSB	AD7524LN	AD7524CQ	AD7524UQ
	PLCC ⁴ (P-20A)		LCCC ⁵ (E-20A)
±1.2LSB	AD7524JP		AD7524SE
±1.4LSB	AD7524KP		AD7524TE
±1.8LSB	AD7524LP		AD7524UE

NOTES

¹To order MIL-STD-883, Class B processed parts, add 883B to part number. Contact your local sales office for military data sheet. For U.S. Standard Military Drawing (SMD) see DESC drawing #5962-87700.

²See Section 14 for package outline information.

³Also available in SOIC package (AD7524JR).

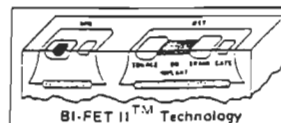
⁴PLCC: Plastic Leaded Chip Carrier.

⁵LCCC: Leadless Ceramic Chip Carrier.



Operational Amplifiers/Buffers

LF411A/LF411 Low Offset, Low Drift JFET Input Operational Amplifier



LF411A/LF411

General Description

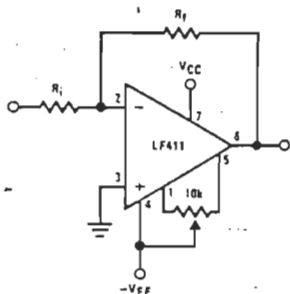
These devices are low cost, high speed, JFET input operational amplifiers with very low input offset voltage and guaranteed input offset voltage drift. They require low supply current yet maintain a large gain bandwidth product and fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The LF411 is pin compatible with the standard LM741 allowing designers to immediately upgrade the overall performance of existing designs.

These amplifiers may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample and hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage and drift, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth.

Features

■ Internally trimmed offset voltage	0.5 mV(max)
■ Input offset voltage drift	$10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}(\text{max})$
■ Low input bias current	50 pA
■ Low input noise current	$0.01 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
■ Wide gain bandwidth	3 MHz(min)
■ High slew rate	$10 \text{ V}/\mu\text{s}(\text{min})$
■ Low supply current	1.8 mA
■ High input impedance	$10^{12} \Omega$
■ Low total harmonic distortion $A_V = 10$, $R_L = 10 \text{ k}\Omega$, $V_O = 20 \text{ Vp-p}$, $\text{BW} = 20 \text{ Hz} - 20 \text{ kHz}$	< 0.02%
■ Low 1/f noise corner	50 Hz
■ Fast settling time to 0.01%	2 μs

Typical Connection



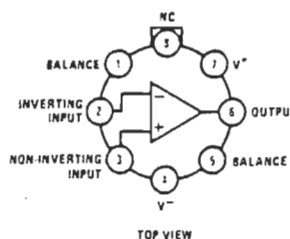
Ordering Information

LF411XYZ

- X indicates electrical grade
- Y indicates temperature range
- "M" for military,
- "C" for commercial
- Z indicates package type
- "H" or "N"

Connection Diagrams

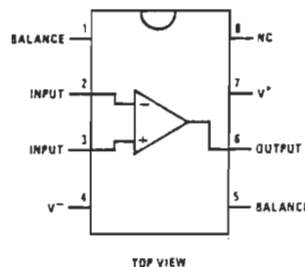
LF411AMH/LF411MH, LF411ACH/LF411CH
Metal Can Package



Note. Pin 4 connected to case.

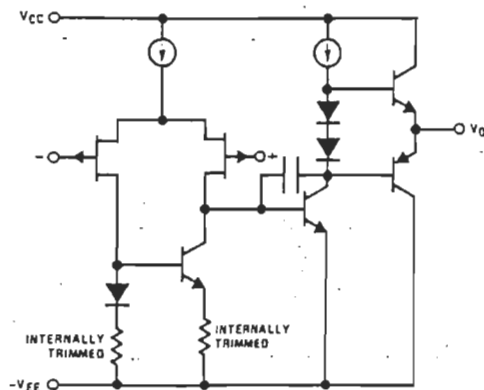
Order Number LF411AMH, LF411MH, LF411ACH
or LF411CH
See NS Package H08B

LF411ACN, LF411CN
Dual-In-Line Package



Order Number LF411ACN or LF411CN
See NS Package N08A

Simplified Schematic



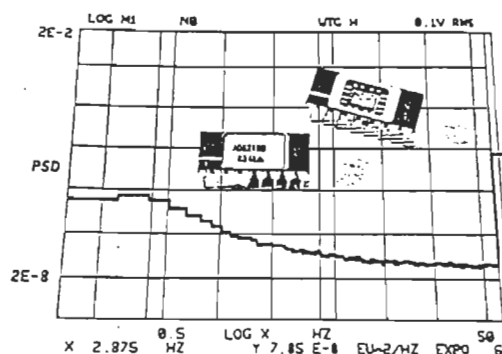
Bi-FET II™ is a trademark of National Semiconductor Corp.



Precision Instrumentation Amplifier

FEATURES

Low Noise: $0.2\mu\text{V}$ p-p 0.1Hz to 10Hz
 Low Gain TC: 5ppm max ($G = 1$)
 Low Nonlinearity: 0.001% max ($G = 1$ to 200)
 High CMRR: 130dB max ($G = 500$ to 1000)
 Low Input Offset Voltage: $25\mu\text{V}$, max
 Low Input Offset Voltage Drift: $0.25\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ max
 Gain Bandwidth Product: 25MHz
 Pin Programmable Gains of 1, 100, 200, 500, 1000
 No External Components Required
 Internally Compensated



PRODUCT DESCRIPTION

The AD624 is a high precision low noise instrumentation amplifier designed primarily for use with low level transducers, including load cells, strain gauges and pressure transducers. An outstanding combination of low noise, high gain accuracy, low gain temperature coefficient and high linearity make the AD624 ideal for use in high resolution data acquisition systems.

The AD624C has an input offset voltage drift of less than $0.25\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, output offset voltage drift of less than $10\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, CMRR above 80dB at unity gain (130dB at $G=500$) and a maximum nonlinearity of 0.001% at $G=1$. In addition to these outstanding dc specifications the AD624 exhibits superior ac performance as well. A 25MHz gain bandwidth product, $5\text{V}/\mu\text{s}$ slew rate and $15\mu\text{s}$ settling time permit the use of the AD624 in high speed data acquisition applications.

The AD624 does not need any external components for pre-trimmed gains of 1, 100, 200, 500 and 1000. Additional gains such as 250 and 333 can be programmed within one percent accuracy with external jumpers. A single external resistor can also be used to set the 624's gain to any value in the range of 1 to 10,000.

PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD624 offers outstanding noise performance. Input noise is typically less than $4\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1kHz.
2. The AD624 is a functionally complete instrumentation amplifier. Pin programmable gains of 1, 100, 200, 500 and 1000 are provided on the chip. Other gains are achieved through the use of a single external resistor.
3. The offset voltage, offset voltage drift, gain accuracy and gain temperature coefficients are guaranteed for all pre-trimmed gains.
4. The AD624 provides totally independent input and output offset nulling terminals for high precision applications. This minimizes the effect of offset voltage in gain ranging applications.
5. A sense terminal is provided to enable the user to minimize the errors induced through long leads. A reference terminal is also provided to permit level shifting at the output.

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use; nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

P.O. Box 280; Norwood, Massachusetts 02062 U.S.A.
 Tel: 617/329-4700
 Telex: 924491
 Twx: 710/394-6577
 Cables: ANALOG NORWOODMASS